

# Quelques applications en analyse de sensibilité (outils devenus communs en $10 \pm 1$ ans)

*(l'analyse de sensibilité comme une nouvelle philosophie de vie)*

06/10/2025

G. Poëtte

## ETICS 2016: exposé de S. Da Veiga, une révélation pour moi (!?)

- J'avais pris en main certains outils (Morris, Sobol) mais je restais (suis toujours) un newbie ...
- ... et je découvre cette notion de "moment independent indices"  
(ce terme n'était pas encore utilisé d'ailleurs, si je ne me trompe pas)

## ETICS 2025:

- J'ai quelques applications d'analyse de sensibilité à mon actif ...
- ... et j'aimerais vous parler de certaines d'entre elles ...
- ... Vous faire quelques retours sur comment les indices sont perçus (par les collègues etc.)
- ... Mais j'insiste, je reste un newbie dans la thématique
- Quelques mots sur ces applications/le plan de l'exposé
  - La première est récente, mais assez originale dans les conclusions, même si assez classique
  - La seconde a été publiée mais j'ai envie de la rappeler (peut-être la détailler),
  - La dernière est appliquée sur un exemple simplifié... (Mais démarche mise en place en production)
- TOUTES ont été précieuses en termes d'aide à la décision, j'insisterai là dessus  
(+ cours d'ETICS)

# Plan

Etude d'un modèle d'endommagement pour le durcissement

Étude des hyperparamètres dans la conception de réseaux de neurones

Analyse de sensibilité pour la garantie (sur un exemple simple)

Conclusion



# Le durcissement

- Besoin de garantir certaines fonctions présence de sollicitations sévères
- Besoin de durcir à certains rayonnements/spectres/impacteurs (sollicitations sévères, i.e. grandes vitesses de déformation  $\dot{\epsilon} \gg 1$ , i.e. dynamique rapide)
- Besoin
  - d'identifier des matériaux ayant du potentiel vis-à-vis de sollicitations sévères ...
  - ... puis de caractériser le comportement de matériaux vis-à-vis de sollicitations sévères ...
  - ... et ce, au travers d'expériences et de développements et de calibration de modèles
- Les matériaux "céramiques/composites à matrice céramique" d'intérêt pour nos applications:
  - Bonnes propriétés mécaniques:
    - bon ratio pouvoir d'absorption d'énergie/masse,
    - haute résistance en compression,
    - ténacité augmentée par rapport au dense (rend difficile la propagation de fissures),
  - Bonne résistance thermique

Améliorer nos connaissances des céramiques poreuses fibrées = projet CERAMOD<sup>2</sup>

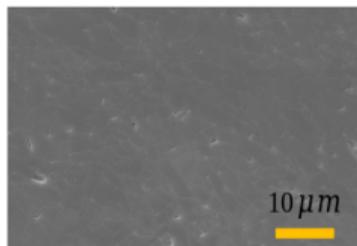
# Le durcissement: la stratégie générale vis-à-vis des CMC

- Besoin d'améliorer nos connaissances des céramiques poreuses fibrées (projet CERAMOD<sup>2</sup>)
  - ⇒ **Fabrication d'échantillons (dans gammes de porosité et de fibres prédéfinies)**
  - ⇒ Campagne expérimentale sur ces échantillons pour des gammes de sollicitations sévères
  - ⇒ Identification ou développement d'un modèle pour prédire le comportement de ces matériaux
  - ⇒ Calibration de modèles sur les données recueillis

Tomographies  
(réalisées par Quentin  
Henry, en thèse à  
l'I2M/Université de  
Bordeaux)

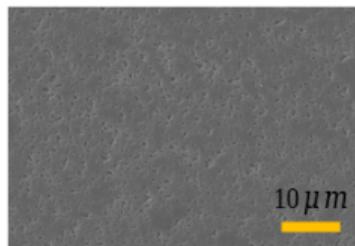


Porosité 0%  
Matériau de référence



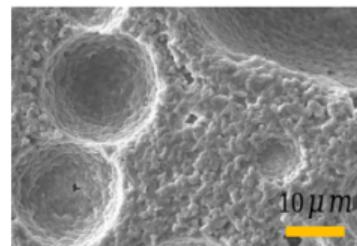
Quelques défauts dans le matériau

Porosité 20%  
Matériau sous fritté



Porosités (~μm) interconnectées

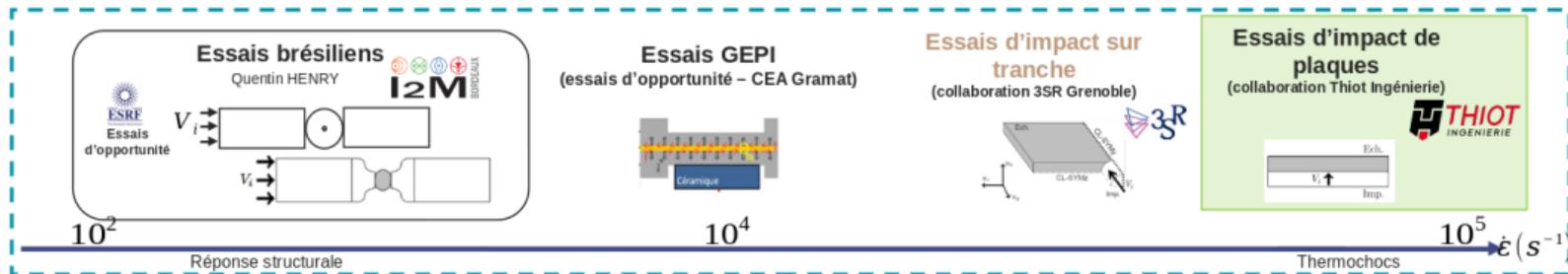
Porosité 60%  
Matériau fritté + porogène



Sphères ( $\varnothing < 200 \mu\text{m}$ ) et porosités  
(~μm) interconnectées

# Le durcissement: la stratégie générale vis-à-vis des CMC

- Besoin d'améliorer nos connaissances des céramiques poreuses fibrées (projet CERAMOD<sup>2</sup>)
  - ⇒ Fabrication d'échantillons (dans gammes de porosité et de fibres prédéfinies)
  - ⇒ **Campagne expérimentale sur ces échantillons pour des gammes de sollicitations sévères**
  - ⇒ Identification ou développement d'un modèle pour prédire le comportement de ces matériaux
  - ⇒ Calibration de modèles sur les données recueillies

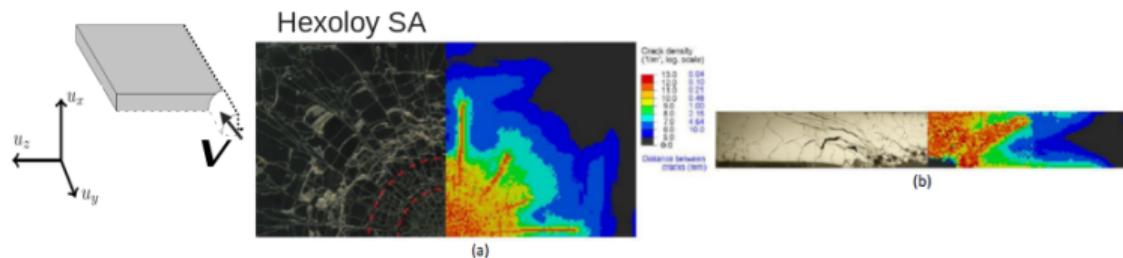


# Le modèle XXX vis-à-vis des CMC

- Besoin d'améliorer nos connaissances sur les matériaux CMC: Modélisation

⇒ **Identification ou développement d'un modèle pour prédire le comportement de ces matériaux**

Modèle : bonne comparaison simulation/expérience pour des céramiques denses



Essai tandem [Duplan, 2020]

- XXX en quelques mots:

- Modèle probabiliste de la distribution des défauts: prise en compte de la variabilité inter-échantillons distribution aléatoire des zones de fragilité (initiation de fissures) basée sur le modèle de Weibull [22]
- Modèle elasto-plastique complet + endommagement anisotrope
- Modèle sensible à la vitesse de déformation ( $\dot{\epsilon}$ ), pertinent en dynamique rapide
- Modèle ayant fait ses preuves sur des céramiques denses

⇒ Choix de partir de XXX + éventuelles modifications selon les besoins

# Le modèle XXX

XXX: un modèle complet, stochastique

- Modèle probabiliste : prise en compte de la variabilité inter-échantillons (Weibull [22])
- Modèle elasto-plastique complet + endommagement anisotrope
- Modèle sensible à la vitesse de déformation ( $\dot{\epsilon}$ ), pertinent en dynamique rapide
- Modèle ayant fait ses preuves sur des céramiques denses

⇒ Choix de partir de XXX + éventuelles modifications selon les besoins  
Illustration du comportement du modèle sur l'essai GEPI [24]  
(GEPI = Générateur Electrique de Pressions Intenses)

Cas d'étude: essai GEPI G672 réalisé au CEA Gramat [Erzar et Buzaud, 2012]

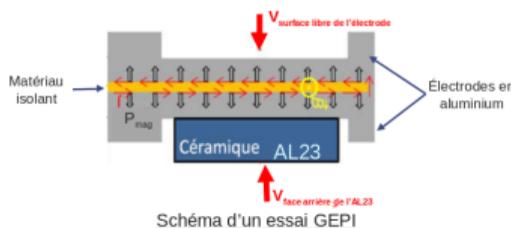


Schéma d'un essai GEPI

Reproduction des essais simulés par [Zinszner, 2015]  
avec Hesione

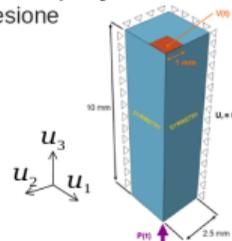
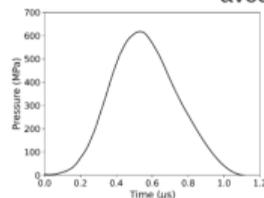


Schéma tiré de [Zinszner, 2015]

# Le modèle XXX

XXX: un modèle complet, stochastique

- Modèle probabiliste : prise en compte de la variabilité inter-échantillons (Weibull [22])
- Modèle elasto-plastique complet + endommagement anisotrope
- Modèle sensible à la vitesse de déformation ( $\dot{\epsilon}$ ), pertinent en dynamique rapide
- Modèle ayant fait ses preuves sur des céramiques denses

⇒ Choix de partir de XXX + éventuelles modifications selon les besoins

Illustration du comportement du modèle sur l'essai GEPI [24]

(GEPI = Générateur Electrique de Pressions Intenses)

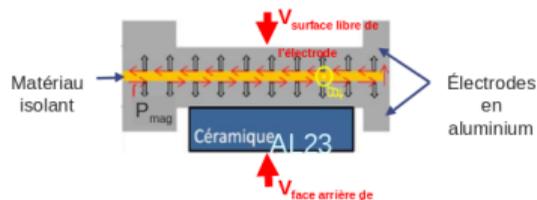
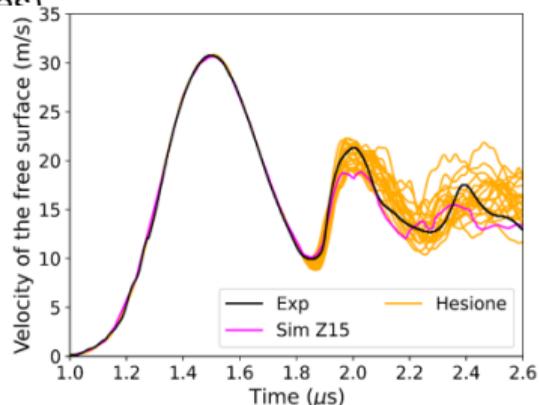


Schéma d'un essai GEPI [Zinszner, 2014]



# V&V: comparaisons expériences/simulations



- Objectif: effectuer des comparaisons expériences/simulations

$$Y_r(t) = Y_{\text{mes}}(t) + \epsilon_{\text{mes}}(t)$$

# V&V: comparaisons expériences/simulations



- Objectif: effectuer des comparaisons expériences/simulations

$$\begin{cases} Y_r(t) = Y_{\text{mes}}(t) + \epsilon_{\text{mes}}(t) \\ Y_r(t) = Y_{\text{mod}}(t, \beta) + \epsilon_{\text{mod}}(t, \beta) \end{cases}$$

# V&V: comparaisons expériences/simulations

- Objectif: effectuer des comparaisons expériences/simulations

$$\begin{cases} Y_r(t) = Y_{\text{mes}}(t) + \epsilon_{\text{mes}}(t) \\ Y_r(t) = Y_{\text{mod}}(t) + \epsilon_{\beta}(t) + \epsilon_{\text{mod}}(t, \beta) \end{cases}$$

# V&V: comparaisons expériences/simulations



- Objectif: effectuer des comparaisons expériences/simulations

$$\begin{cases} Y_r(t) = Y_{\text{mes}}(t) + \epsilon_{\text{mes}}(t) \\ Y_r(t) = Y_{\text{mod,num}}(t) + \epsilon_{\beta}(t) + \epsilon_{\text{num}}(t) + \epsilon_{\text{mod}}(t, \beta) \end{cases}$$

# V&V: comparaisons expériences/simulations



- Objectif: effectuer des comparaisons expériences/simulations

$$Y_{\text{mes}}(t) - Y_{\text{mod,num}}(t) = \epsilon_{\text{mes}}(t) - \epsilon_{\beta}(t) - \epsilon_{\text{num}}(t) - \epsilon_{\text{mod}}(t, \beta)$$

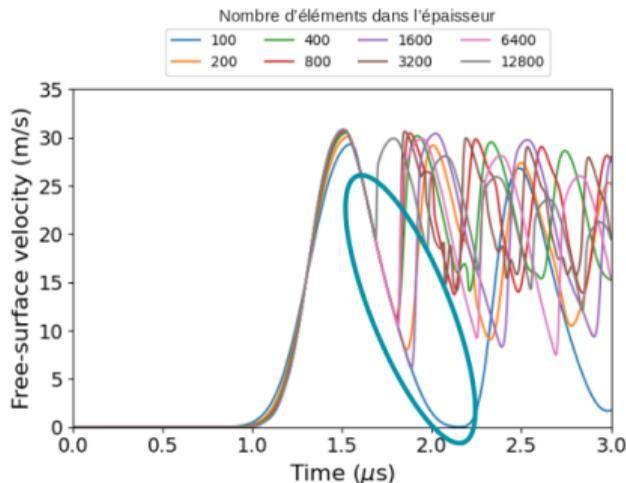
Nécessité de trouver un maillage assurant  $\epsilon_{\text{num}}(t) \ll 1$  (relativement aux autres contributions)

$\implies$  1<sup>er</sup> travail sur le pas de maillage  $\Delta x$  pour réduire  $\epsilon_{\text{num}}$  tout en permettant la calibration

# Travail sur le choix du pas de maillage

Une étude de convergence en maillage

- A paramètres de XXX *fixés* (ceux de [24]), i.e. une étude de convergence *locale*
- Dans une configuration d'intérêt  $\approx$  GEPI (pseudo-1D)

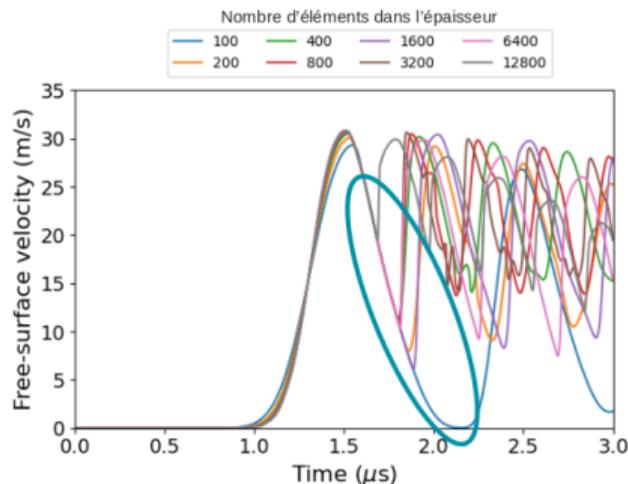


$\Rightarrow$  Pas d'ordre de convergence identifiable dès lors que l'endommagement entre en jeu...

# Travail sur le choix du pas de maillage

Une étude de convergence en maillage

- A paramètres de XXX *fixés* (ceux de [24]), i.e. une étude de convergence *locale*
- Dans une configuration d'intérêt  $\approx$  GEPI (pseudo-1D)



⇒ Questions:

- Est-ce le cas uniquement pour ces paramètres de XXX? Phénomène *local* uniquement?
- Est-ce le cas  $\forall$  les paramètres de XXX? Le phénomène serait global et donc plus problématique

⇒ Recours à une analyse de sensibilité globale (indices de Sobol [14])

# Travail sur le choix du pas de maillage

## Une analyse de sensibilité globale

Les variables de l'analyse de sensibilité globale:

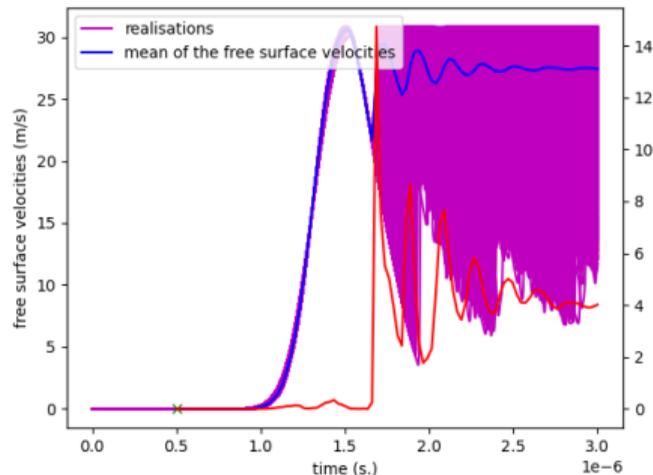
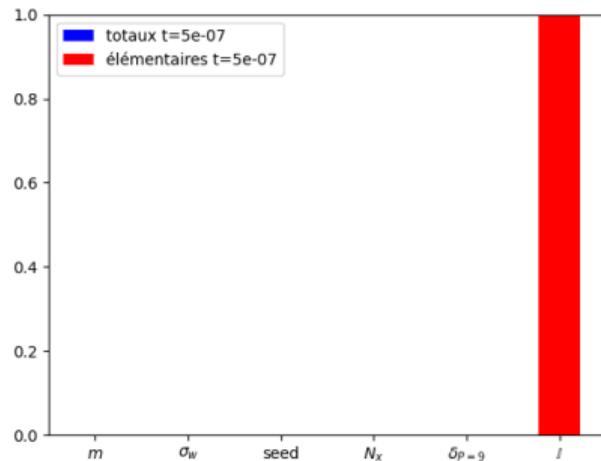
- Le modèle XXX possède 3 principaux paramètres physiques:
  - $m$  est l'exposant de la loi de Weibull distribuant les défauts dans le matériau
  - $\sigma_w$  est la variance de la loi de Weibull distribuant les défauts dans le matériau
  - *seed*: XXX prend en compte la variabilité matériau *via* cette *graine*
- Prise en compte de la variable  $N_x$  (nombre de mailles) dans l'analyse de sensibilité
- XXX est un modèle lourd: recours à la métamodélisation et prise en compte de l'erreur de métamodélisation dans l'analyse de sensibilité  $\delta_p$

⇒ Au final  $X = (m, \sigma_w, \textit{seed}, N_x, \delta_p) \in \mathbb{R}^5$

- Distributions de  $m, \sigma_w, \textit{seed}$  uniforme sur de larges gammes sélectionnées par des experts
- Distribution de  $\Delta x$  uniforme discrète sur une gamme de maillage utilisable en production
- Métamodélisation par Chaos Polynomial non-intrusif [23, 12, 6]

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

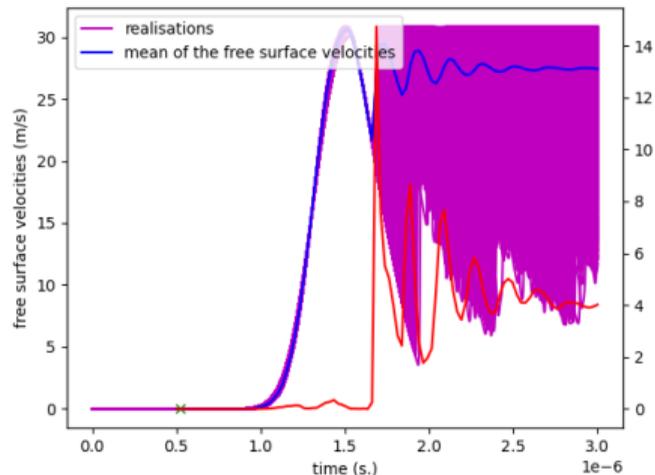
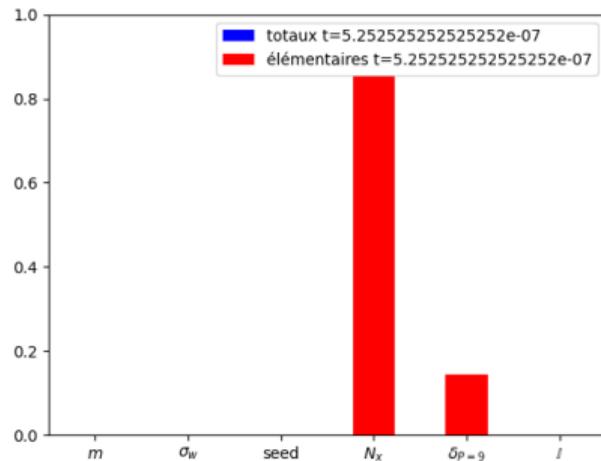
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



(variance nulle: par convention, tout sur les interactions II)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

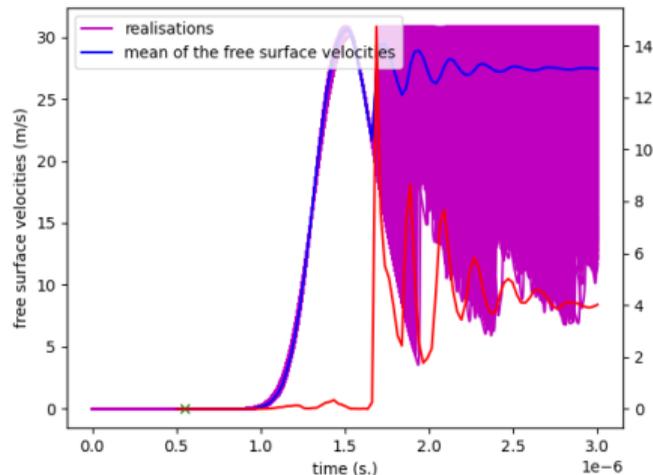
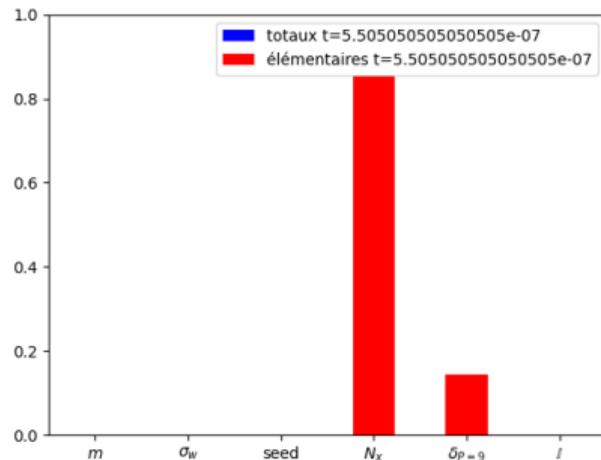
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

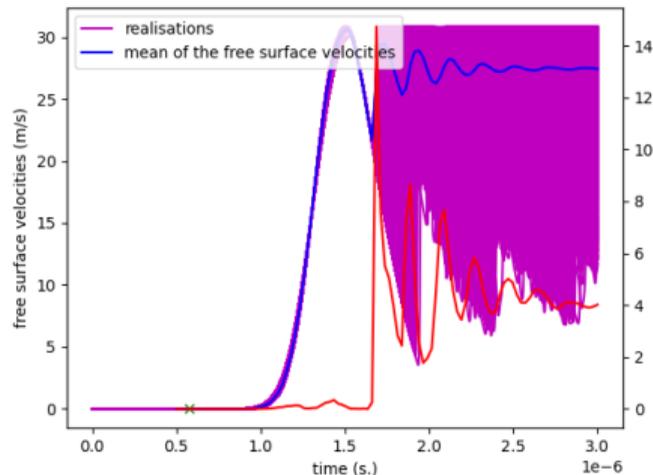
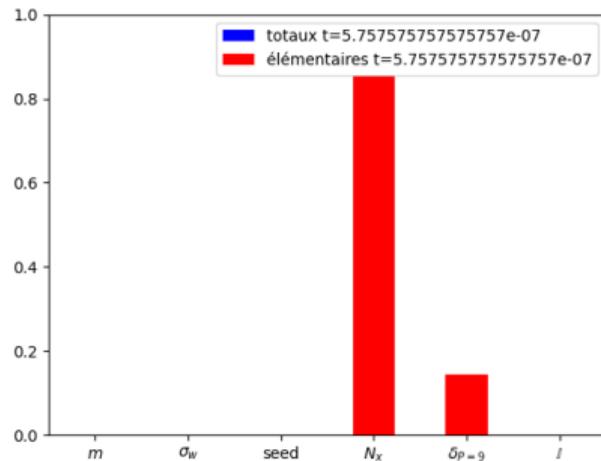
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

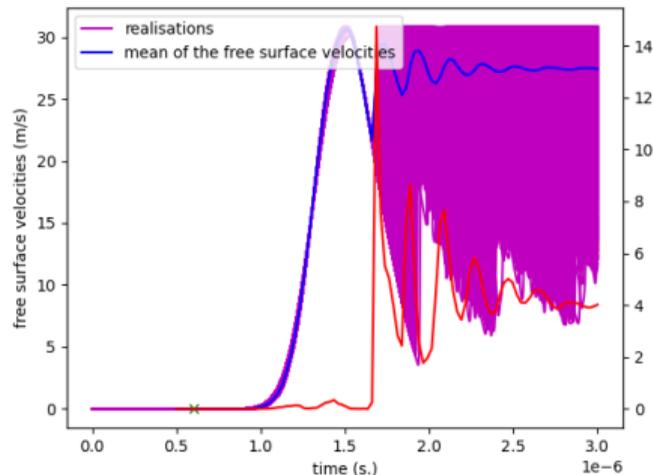
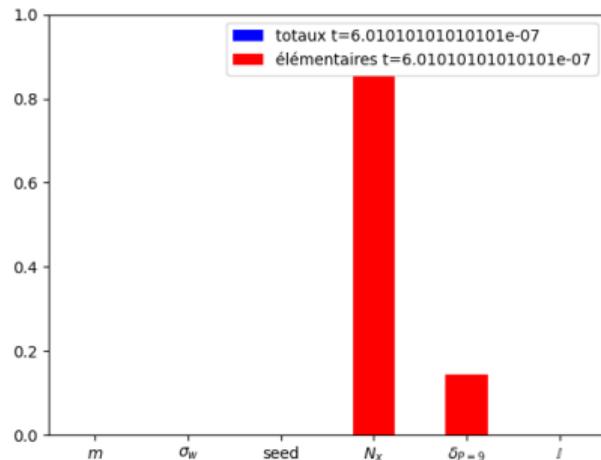
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

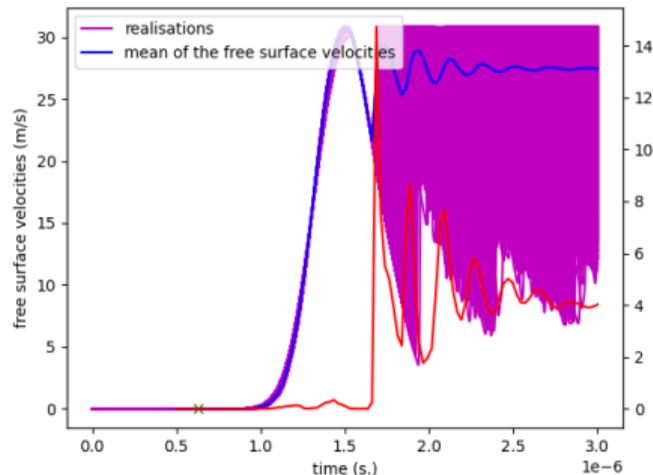
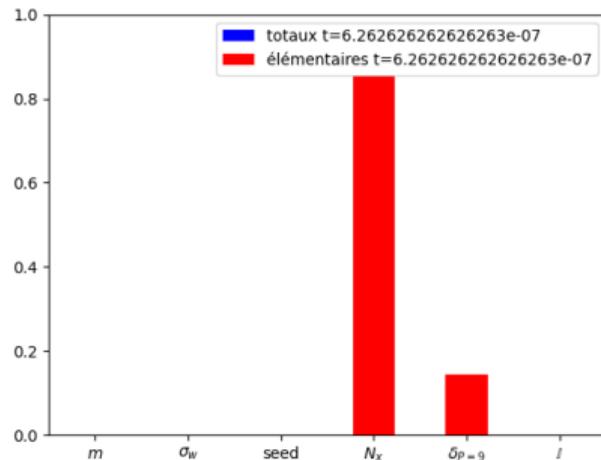
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

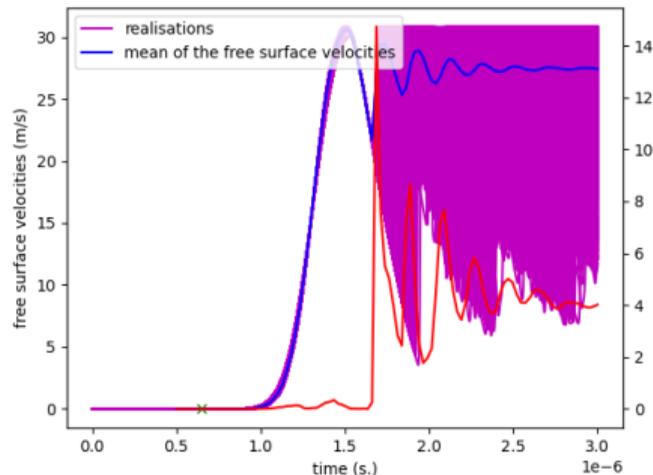
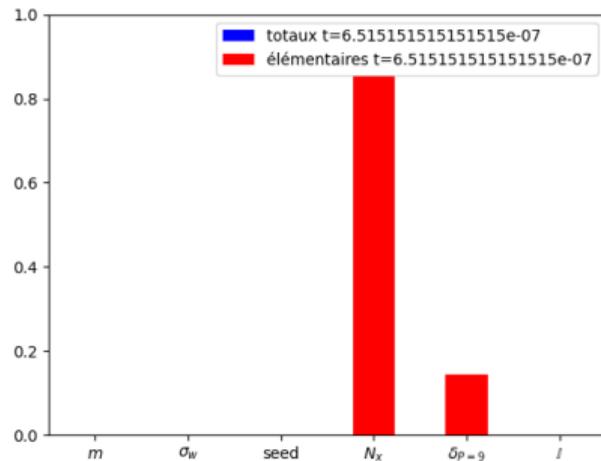
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

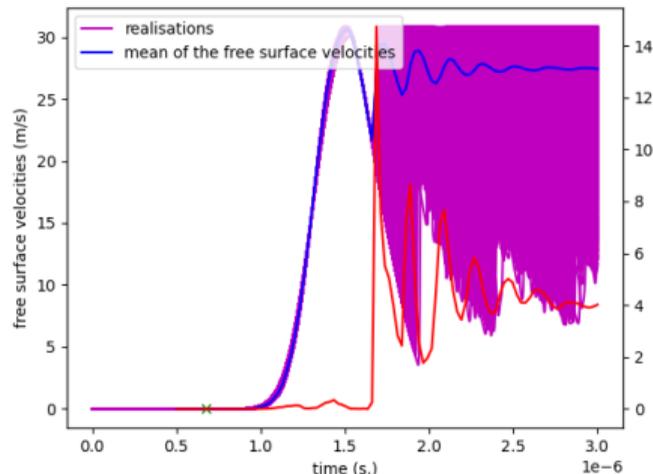
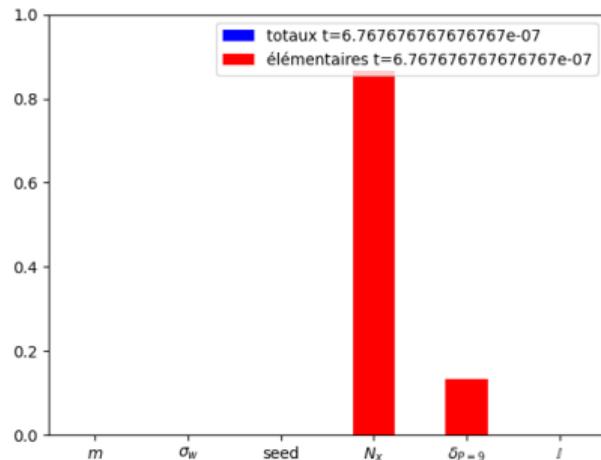
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

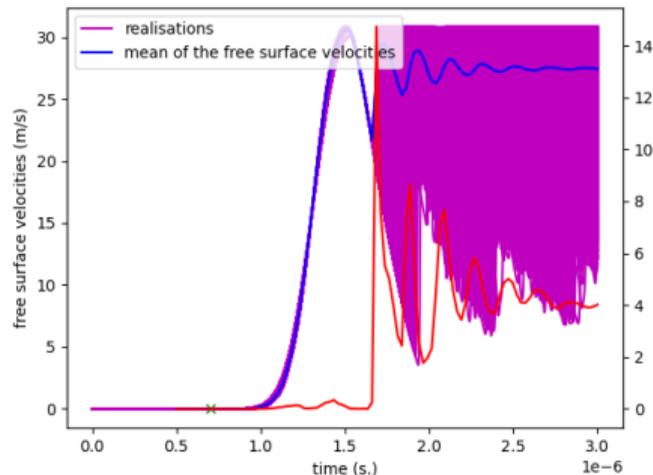
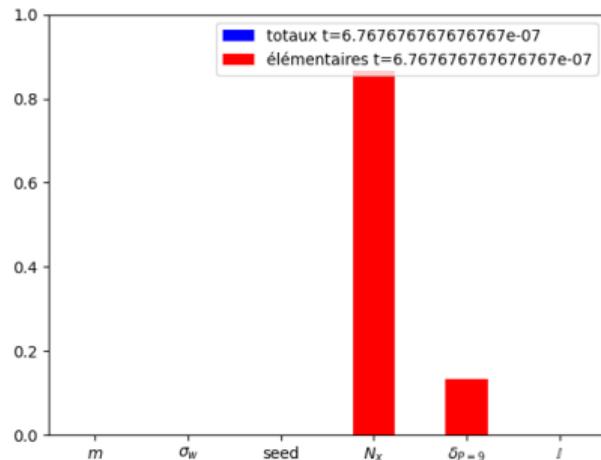
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

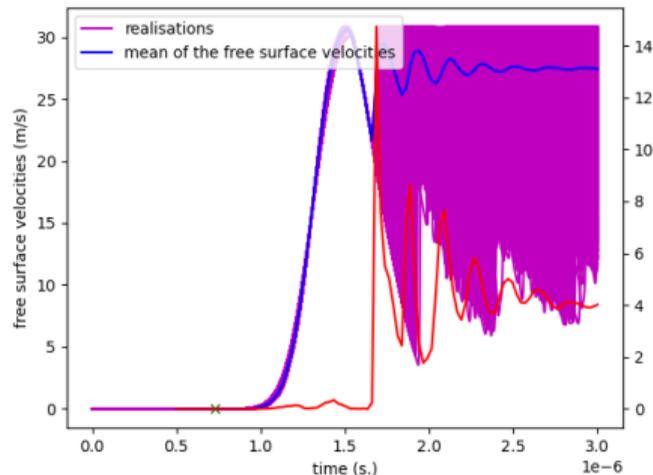
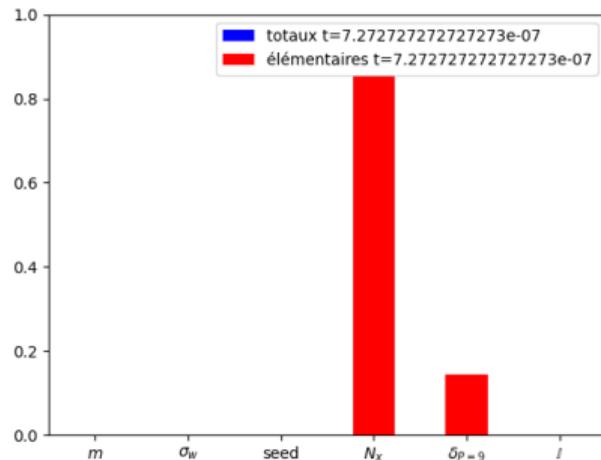
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

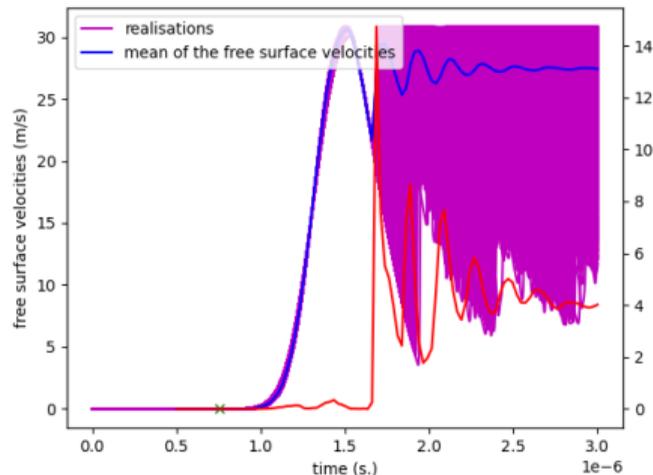
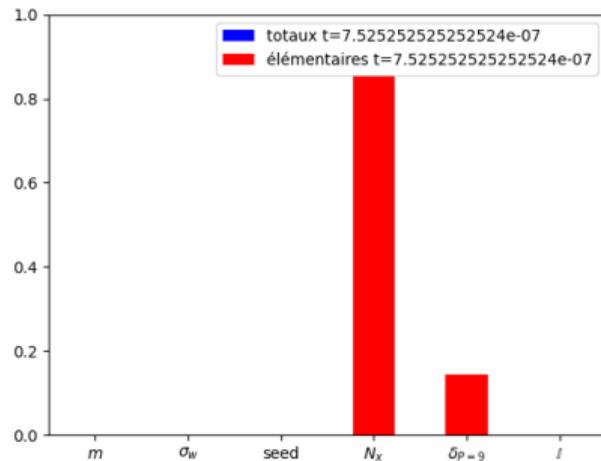
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

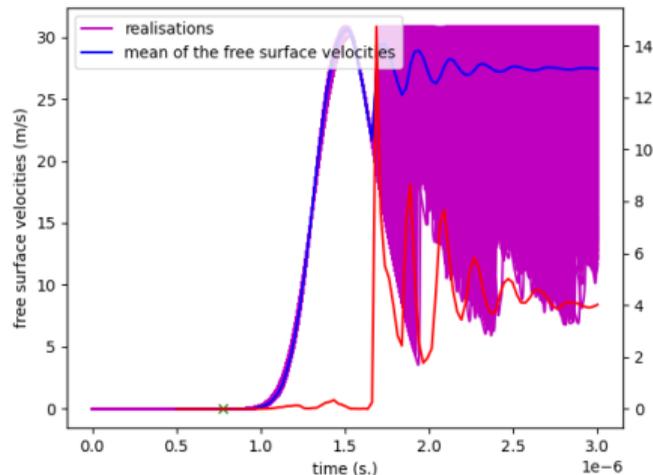
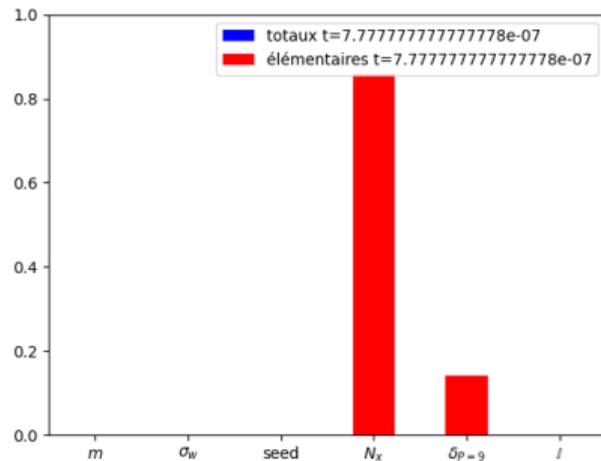
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

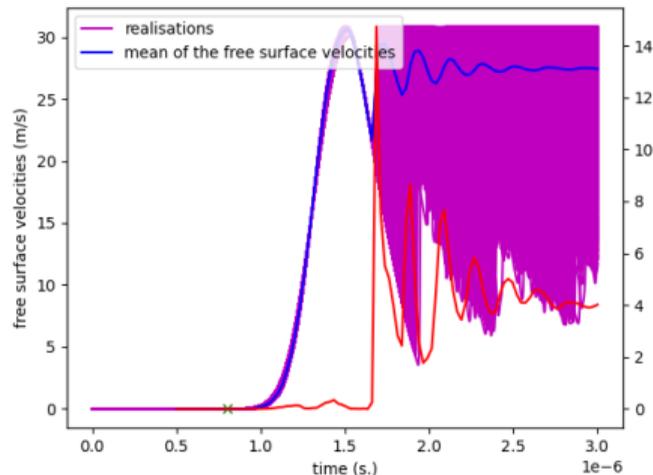
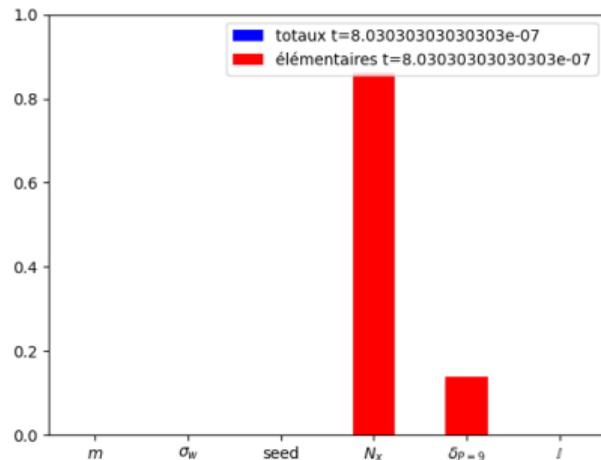
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

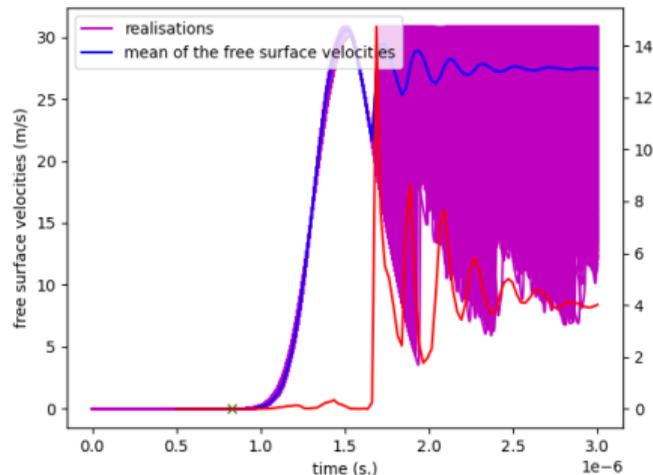
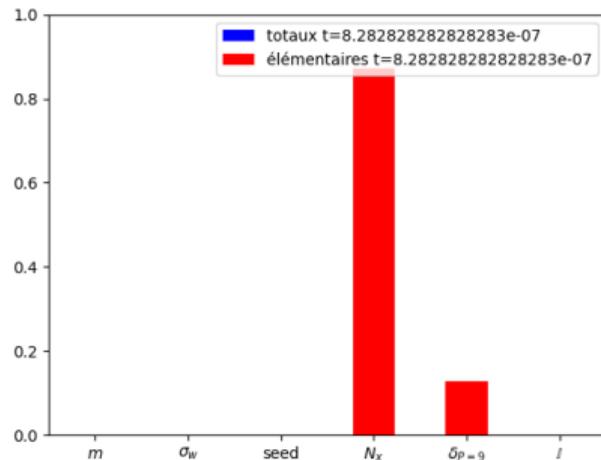
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

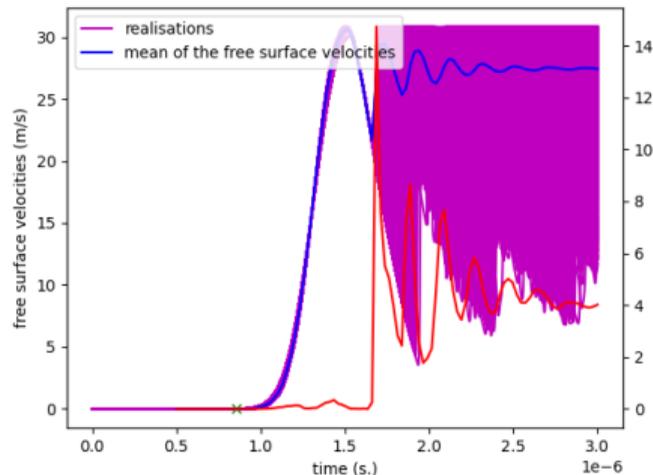
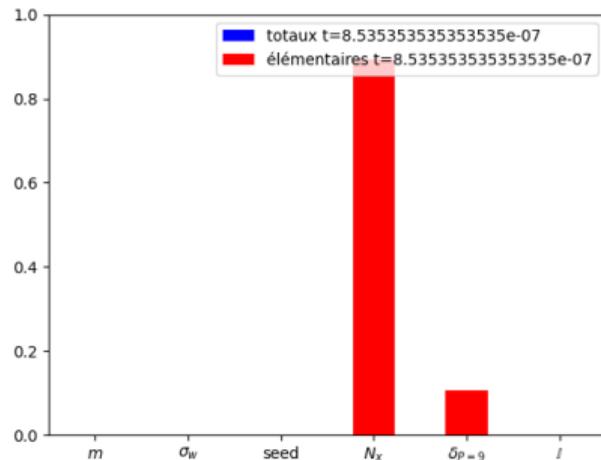
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

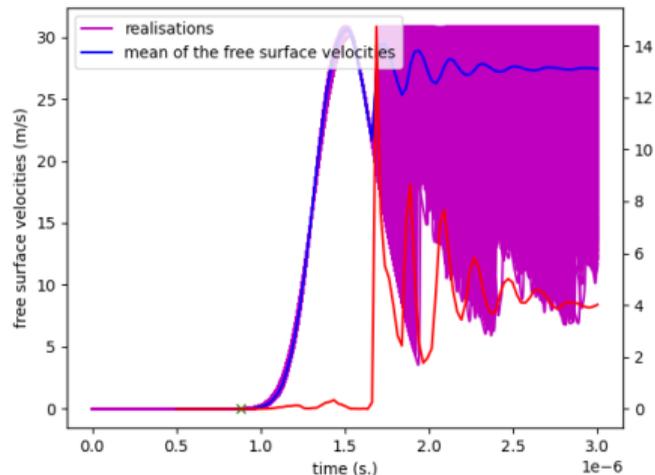
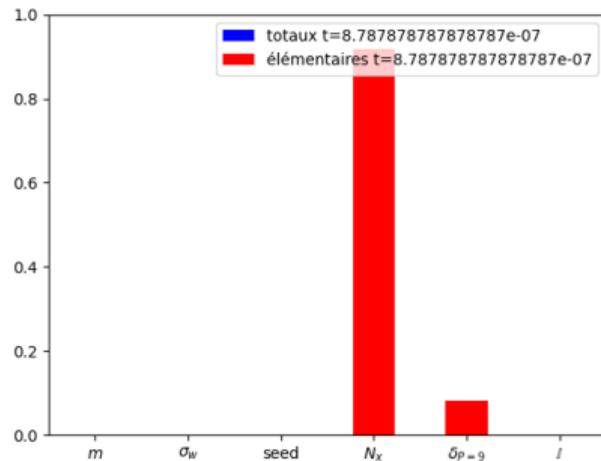
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

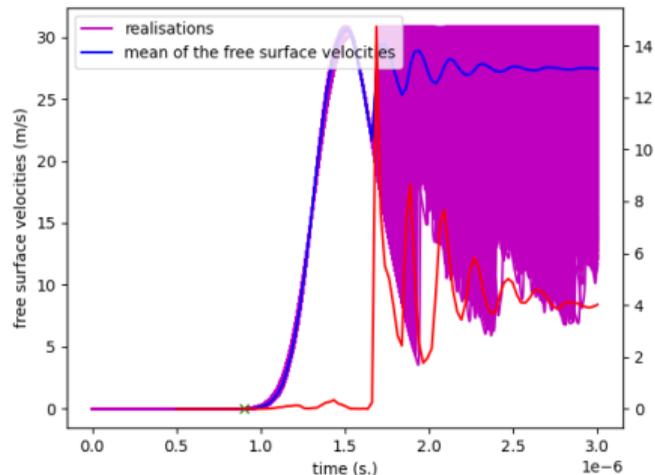
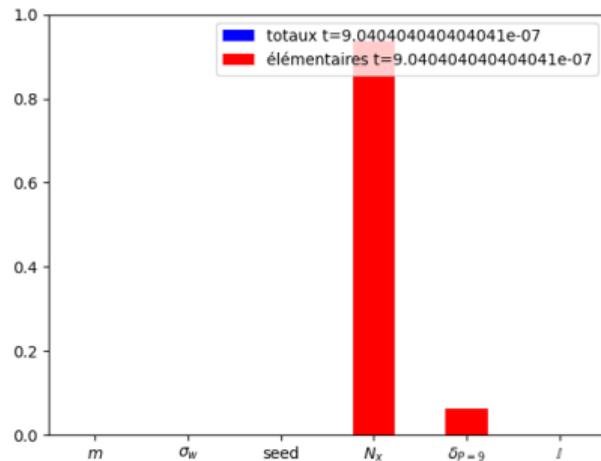
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

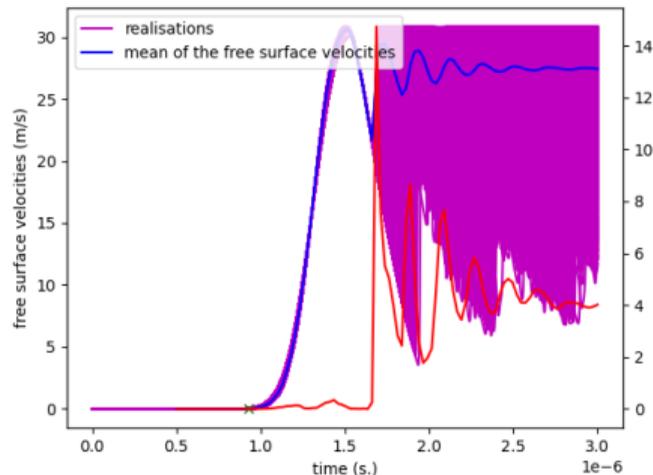
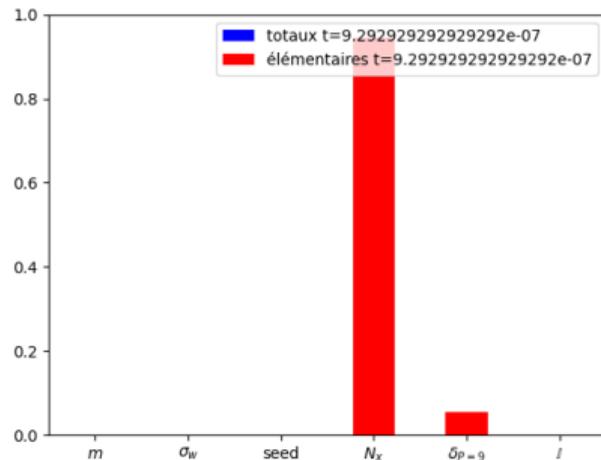
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

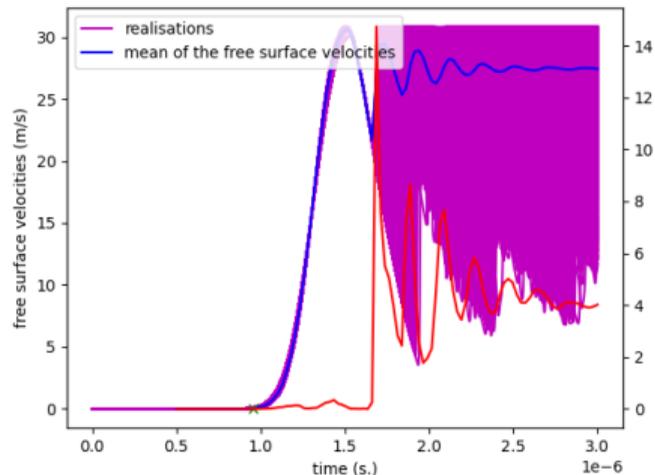
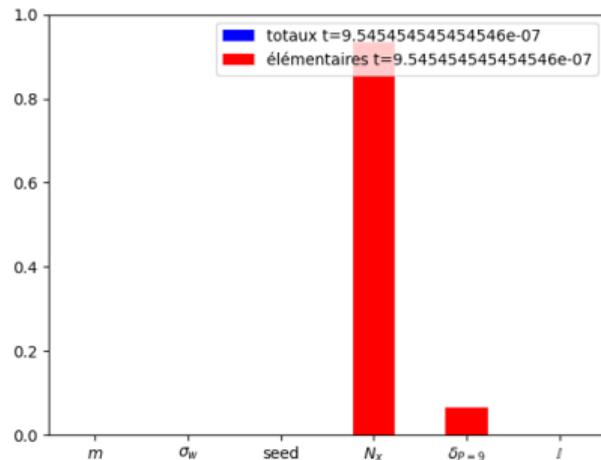
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

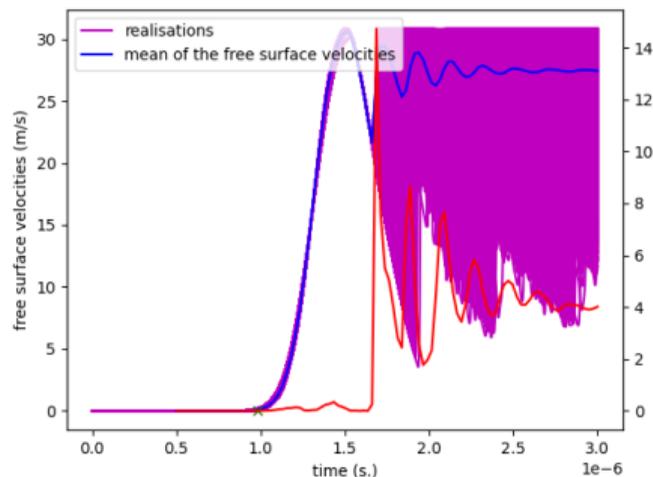
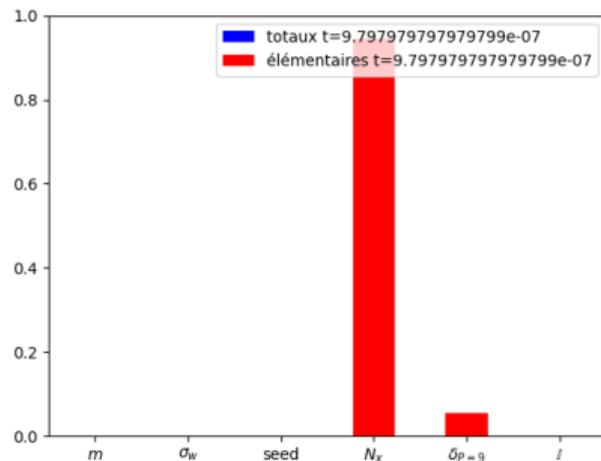
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

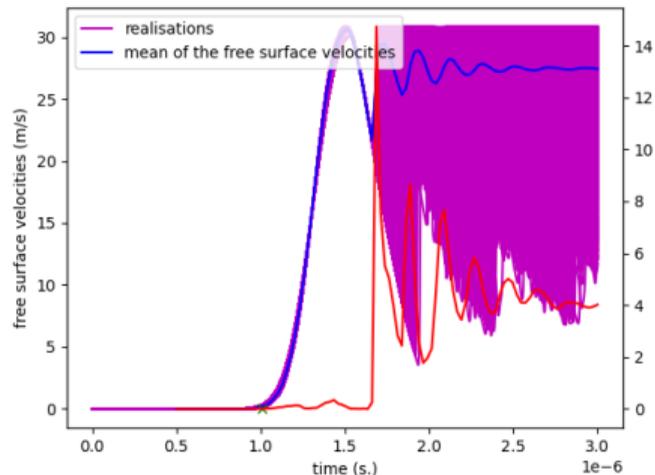
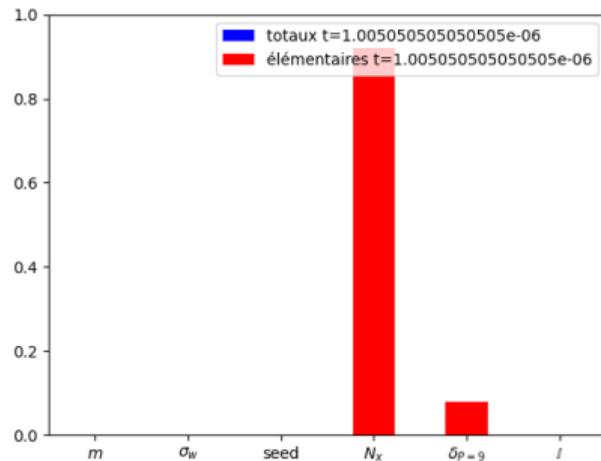
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

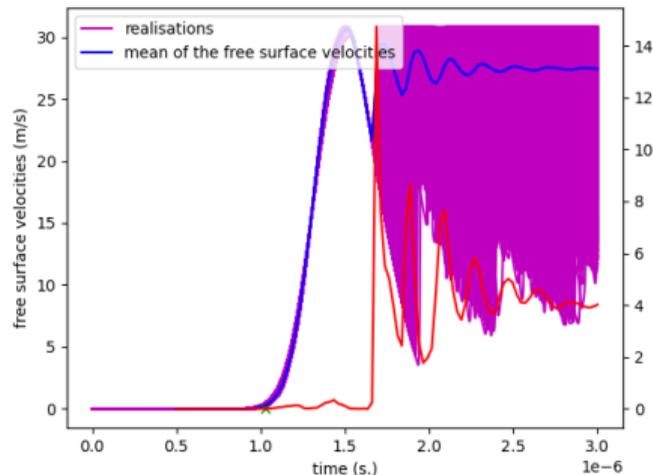
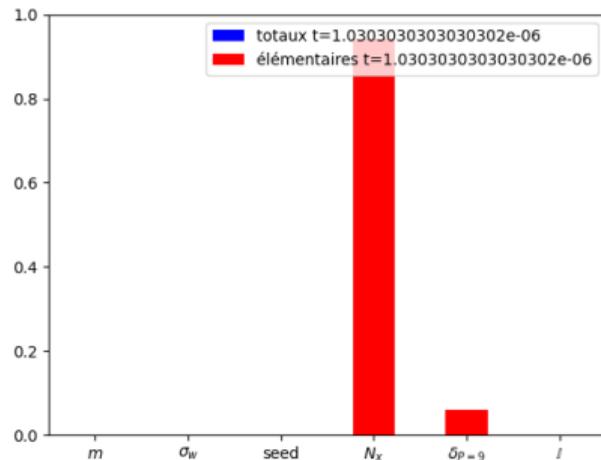
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

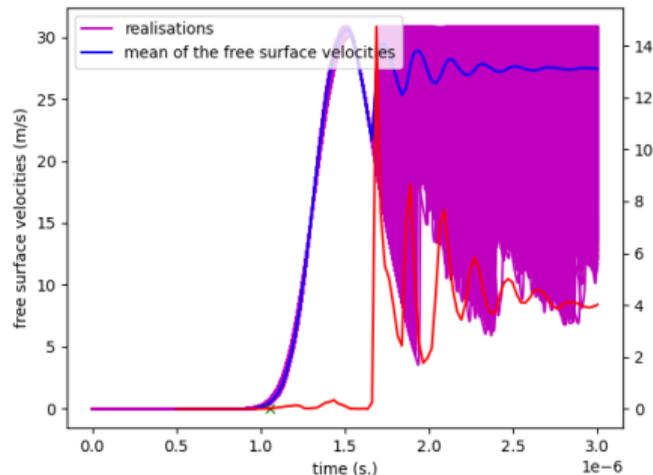
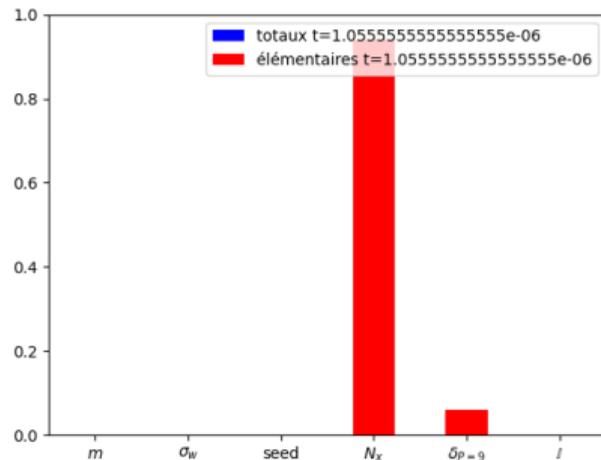
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

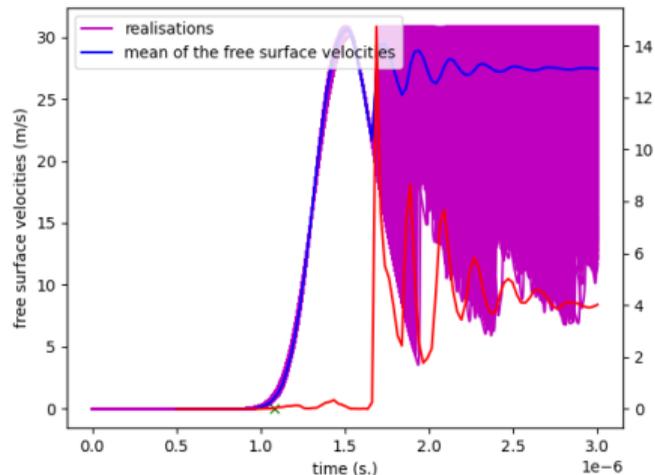
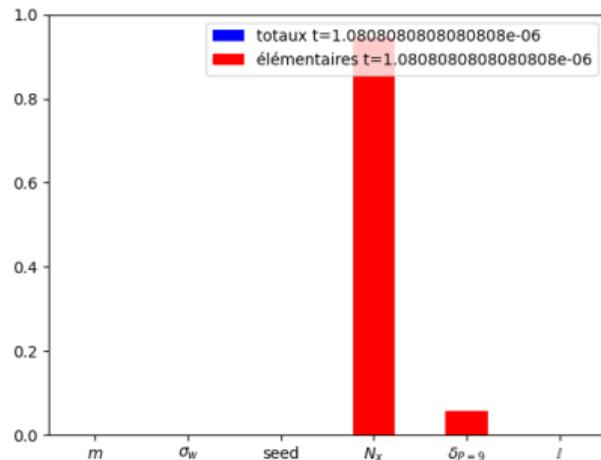
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

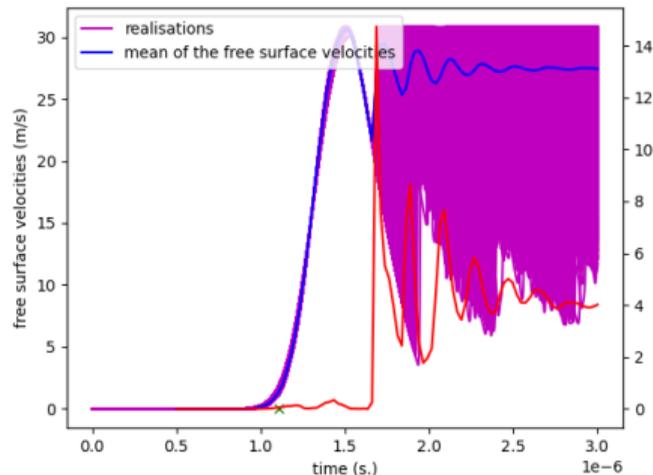
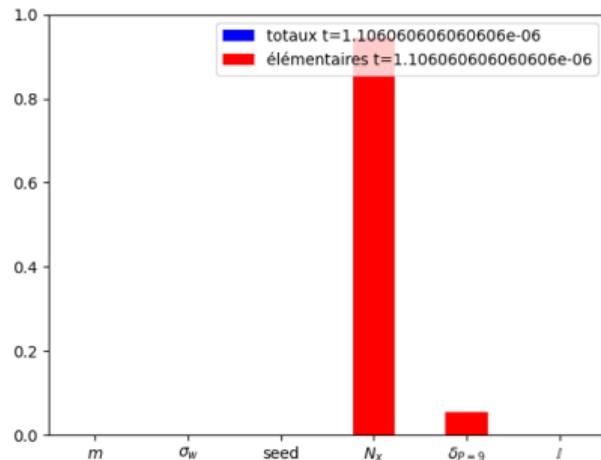
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

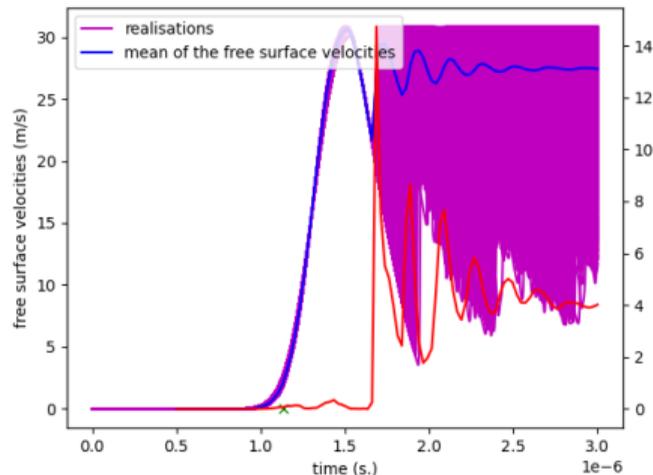
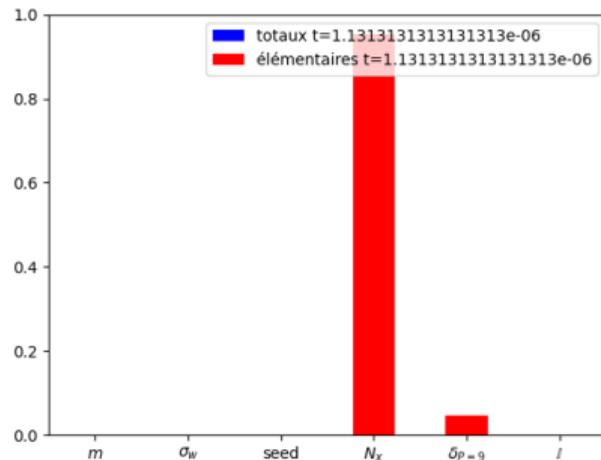
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

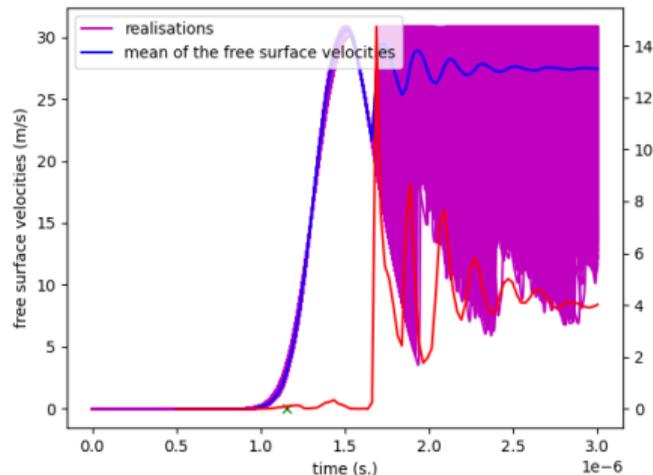
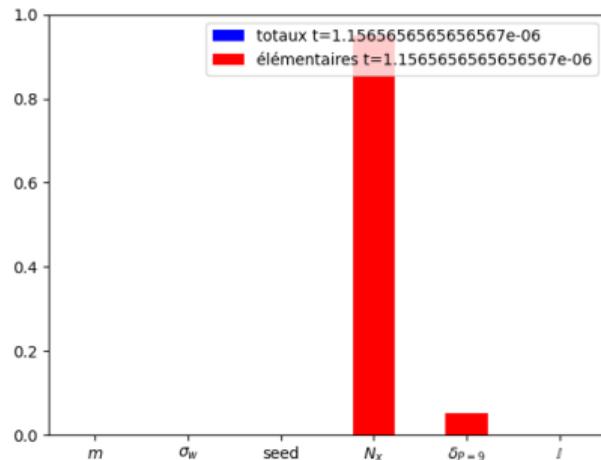
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

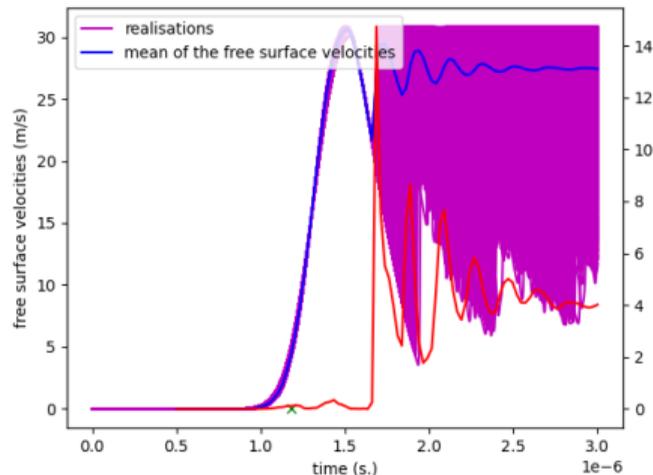
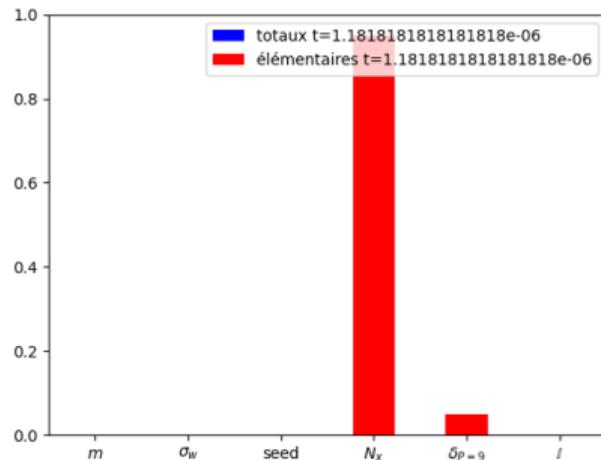
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

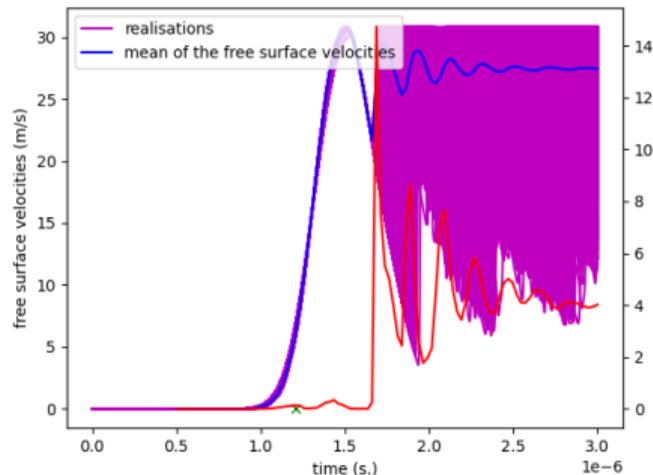
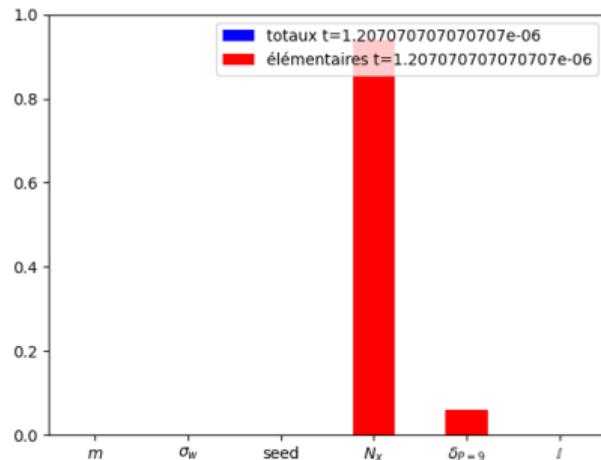
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

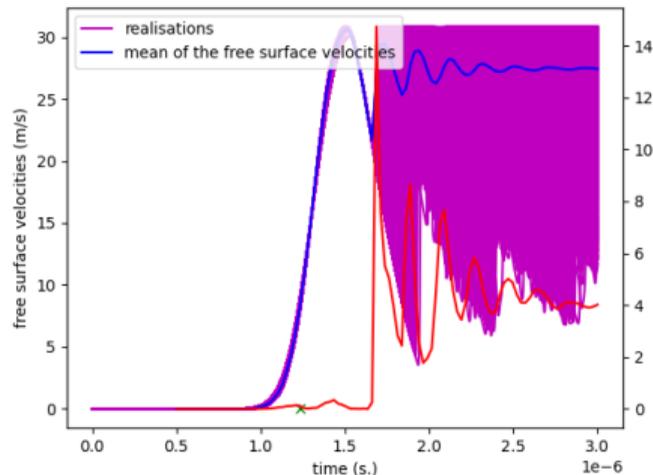
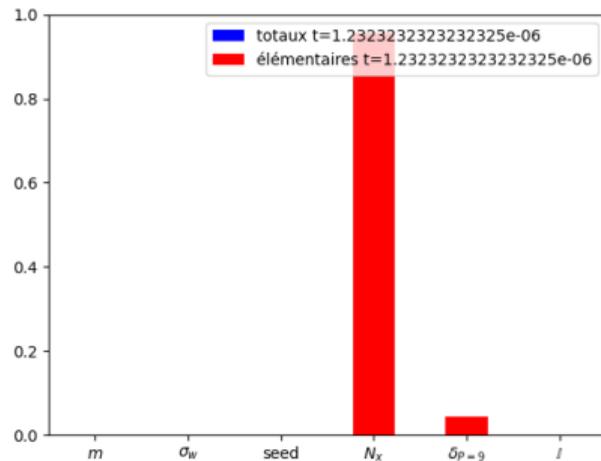
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

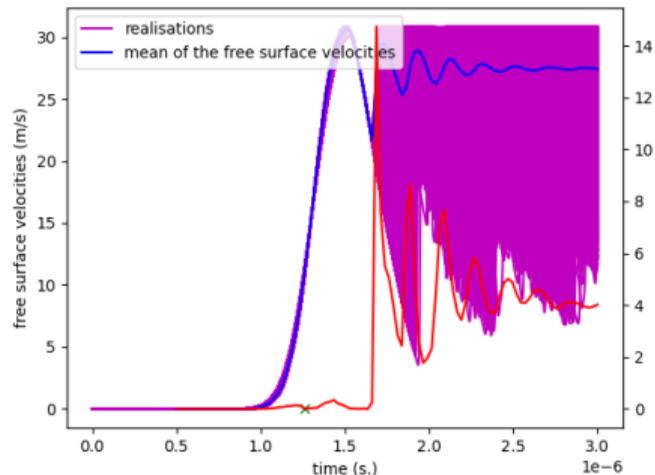
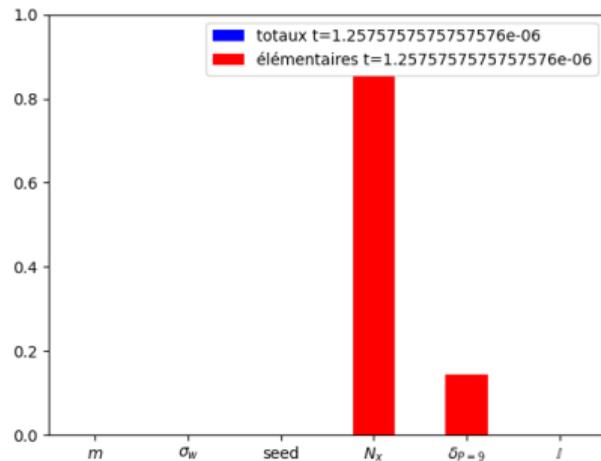
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

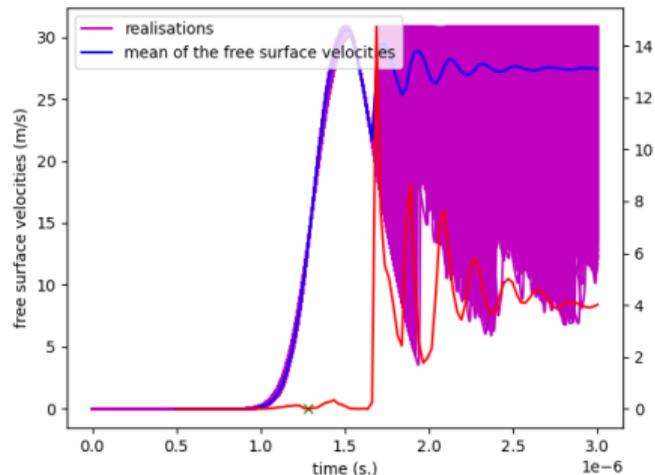
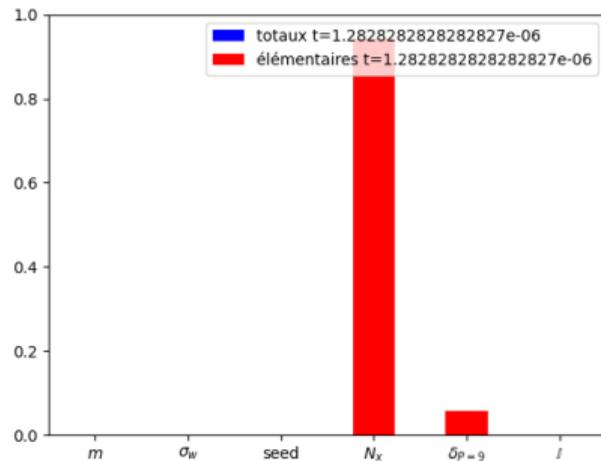
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

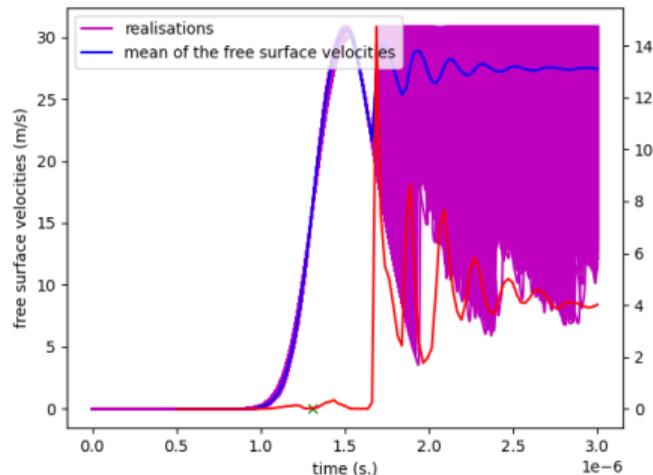
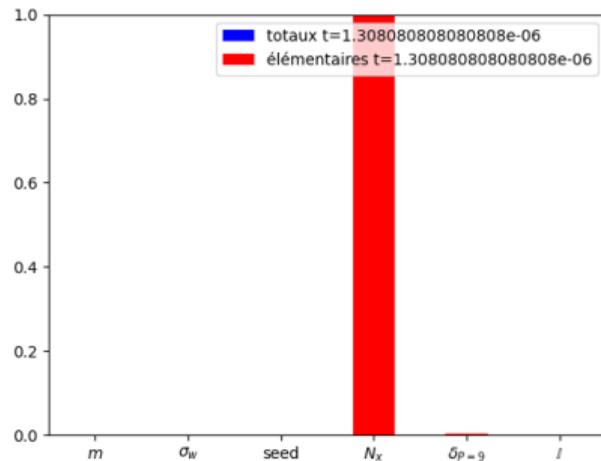
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

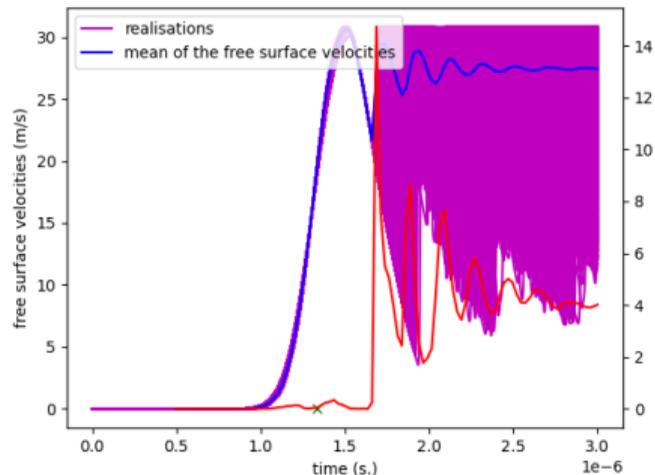
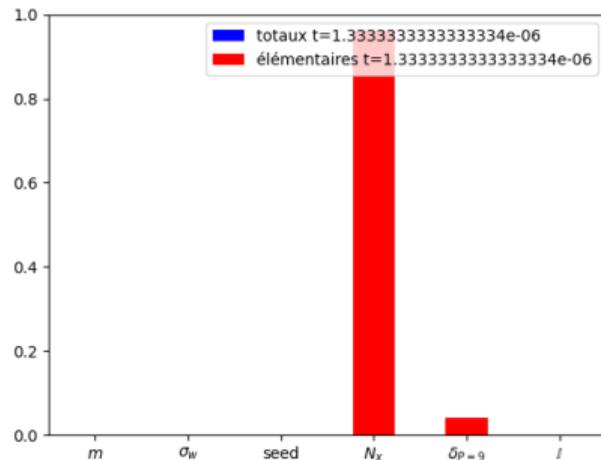
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

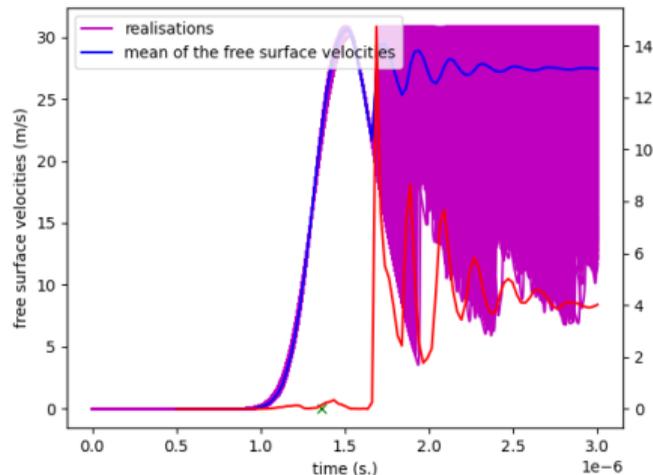
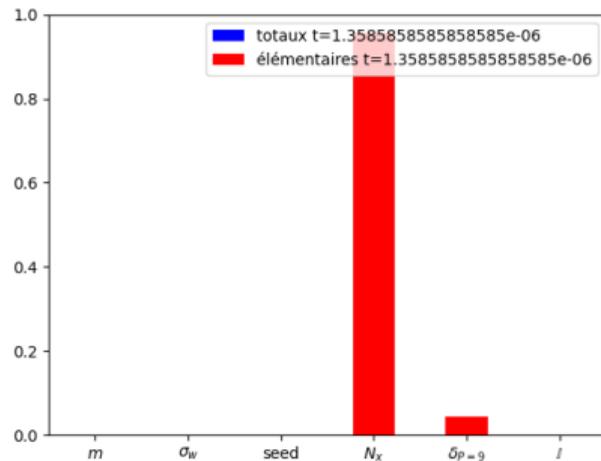
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

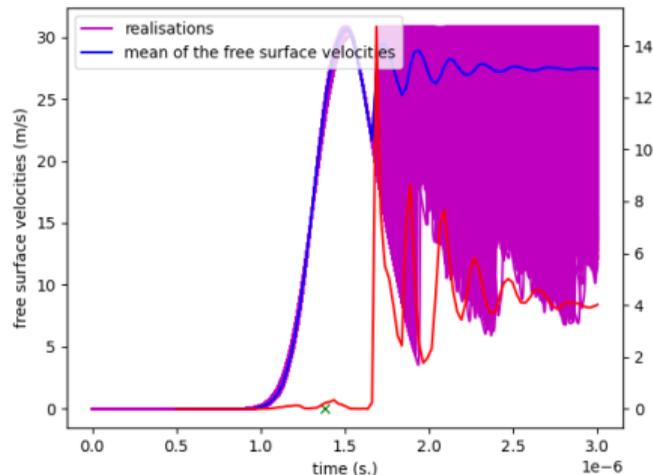
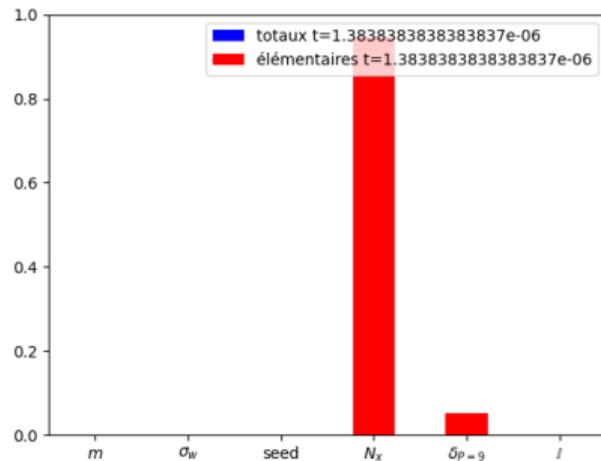
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

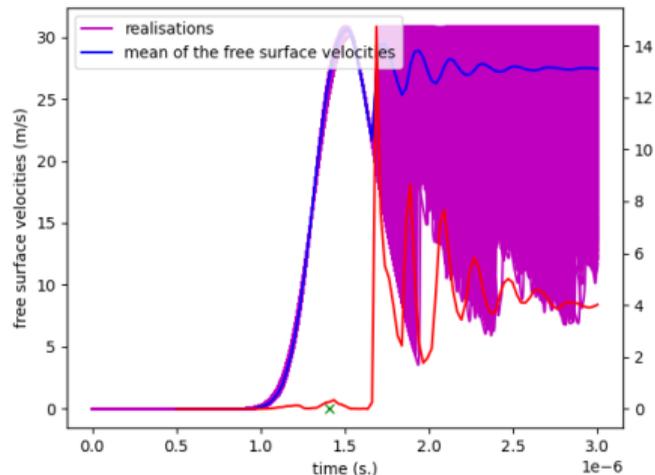
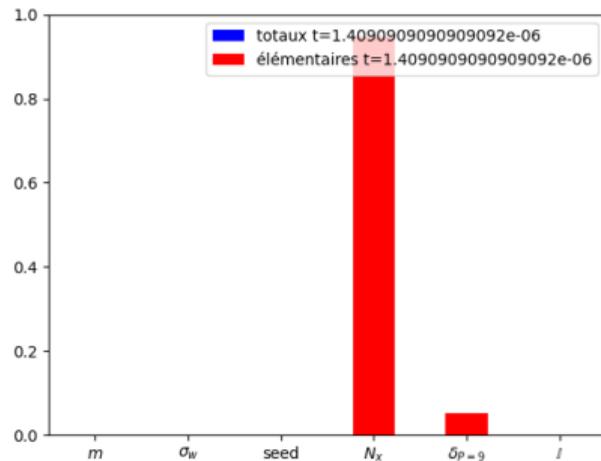
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

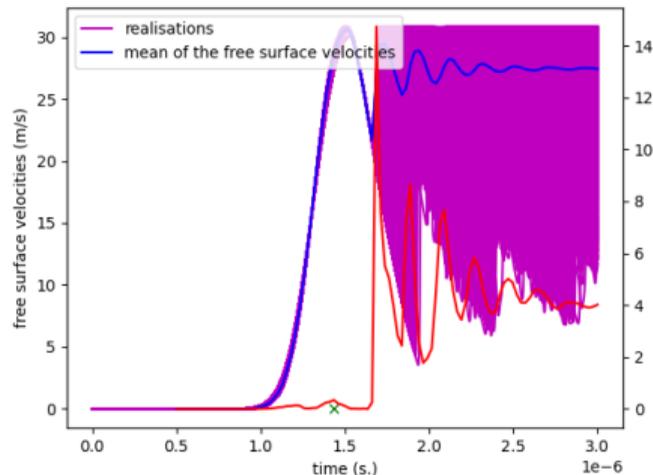
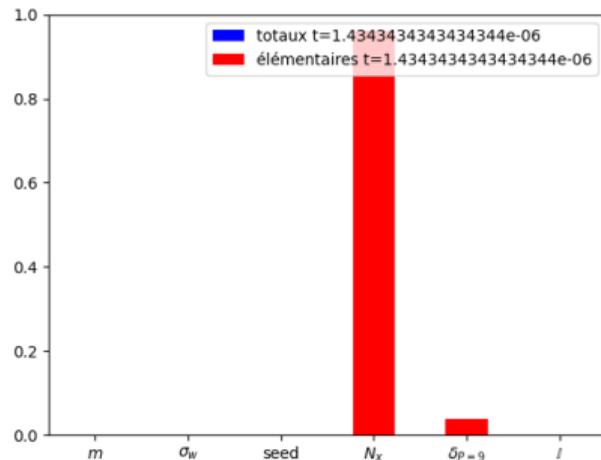
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

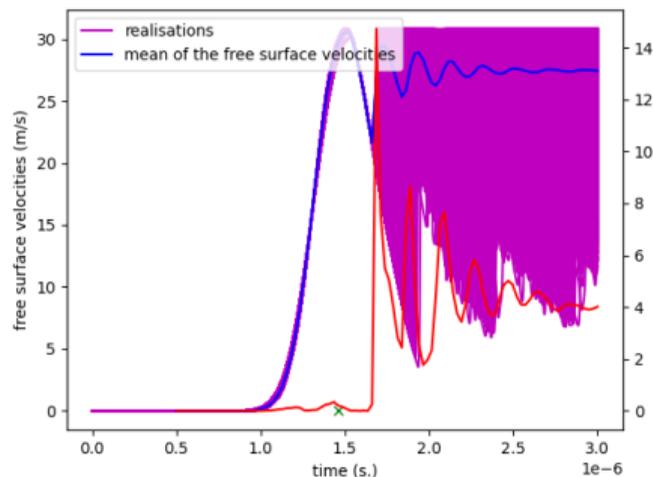
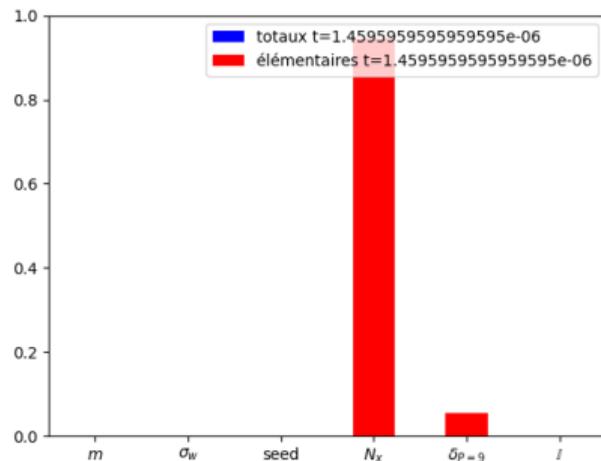
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

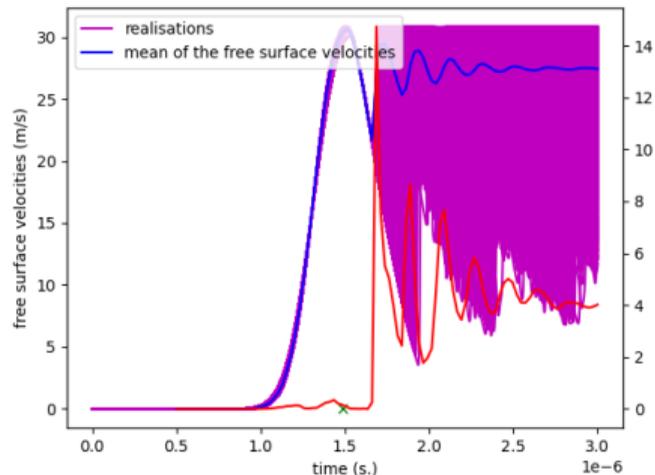
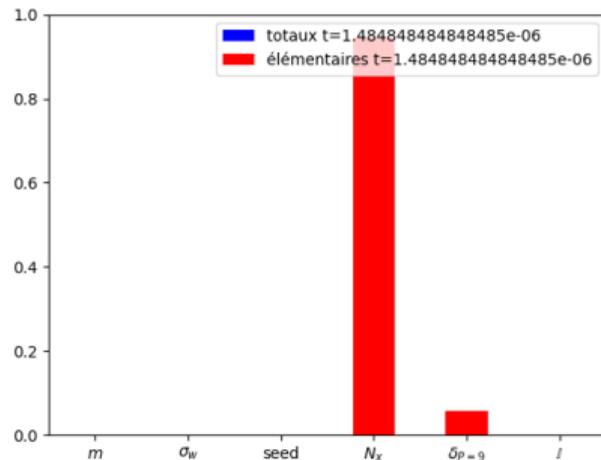
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

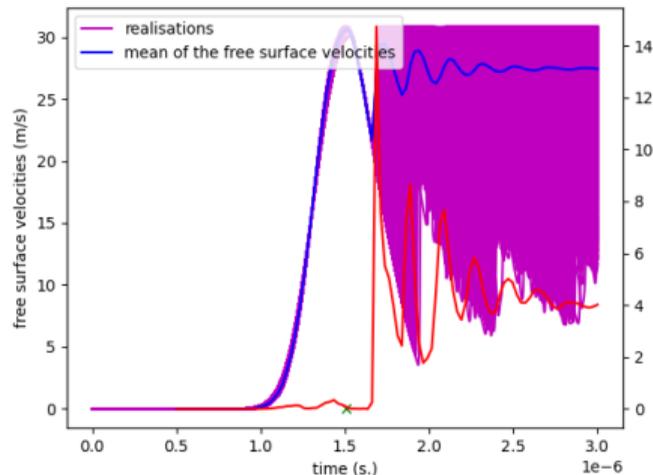
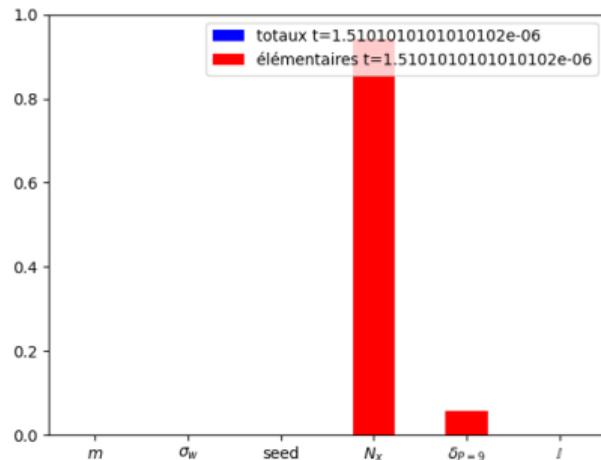
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

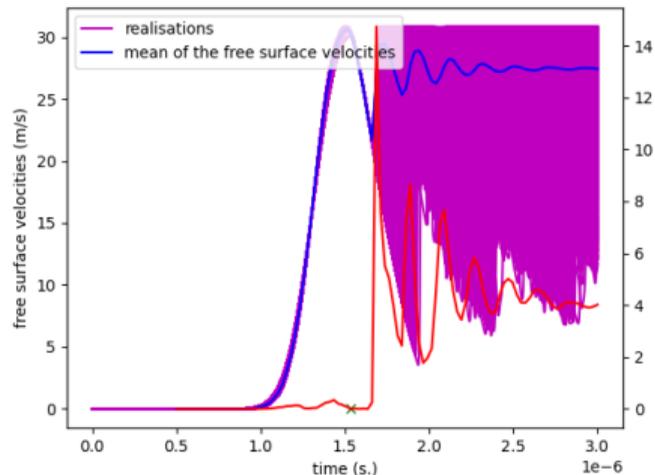
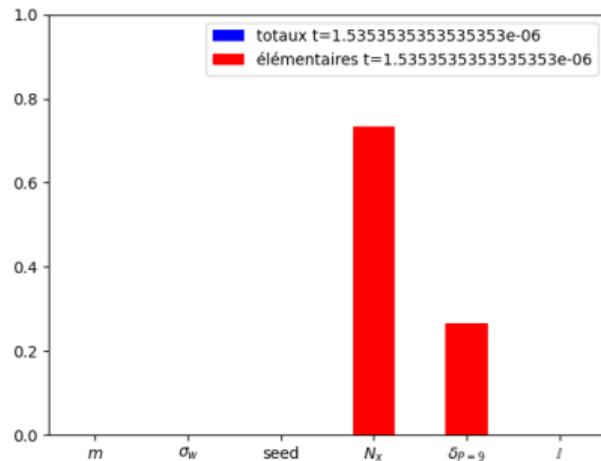
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

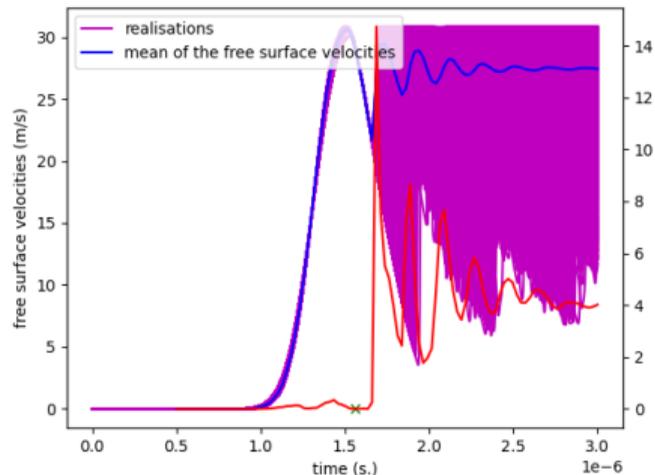
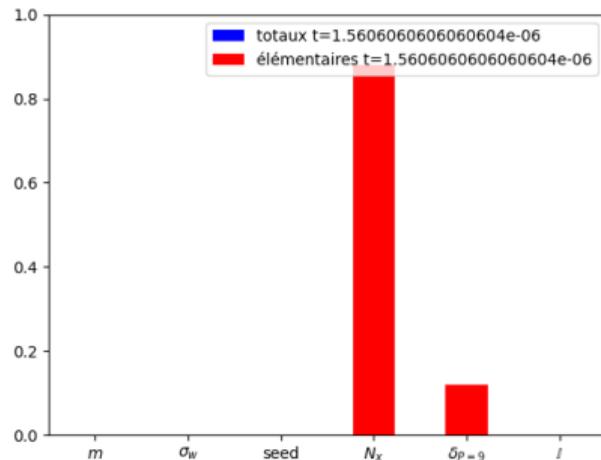
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

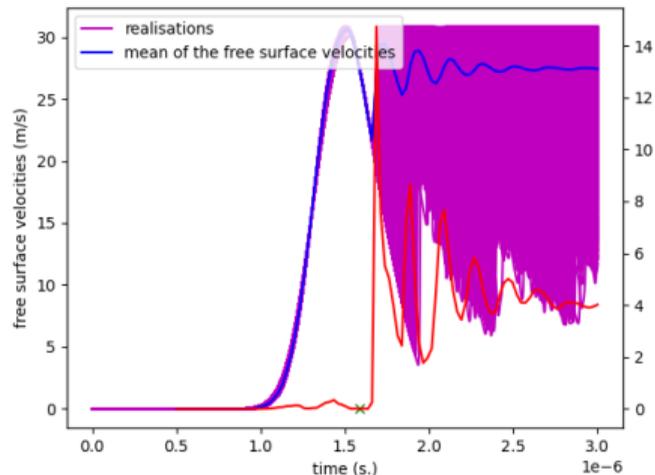
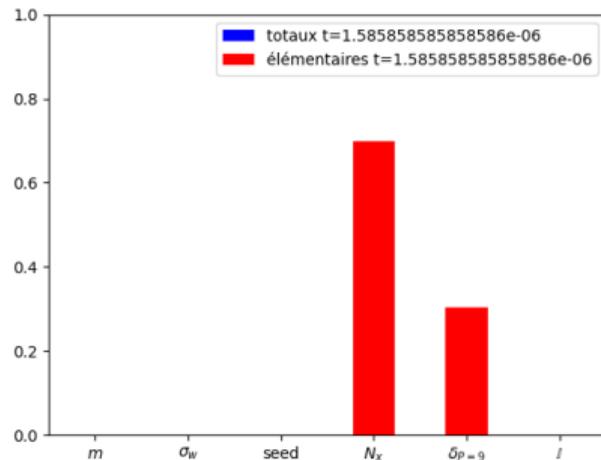
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

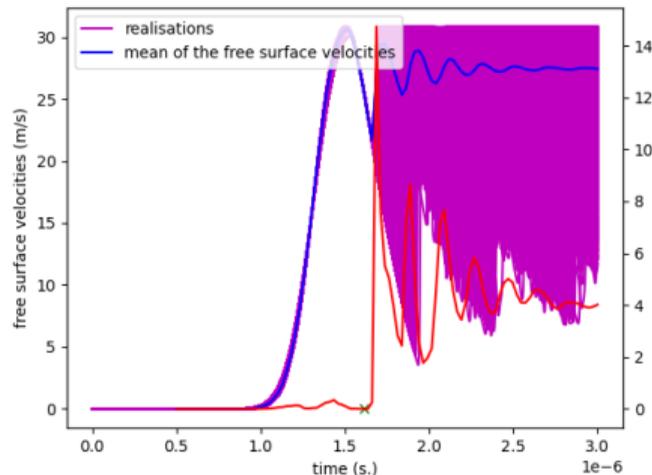
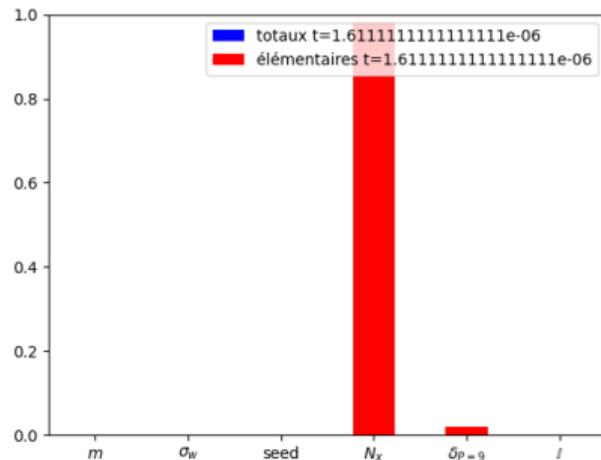
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

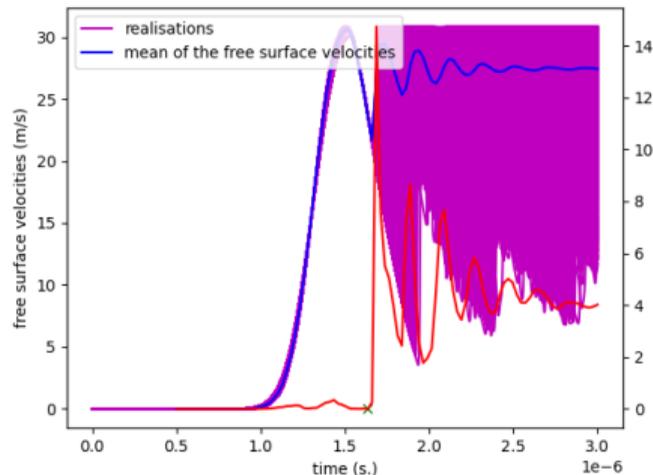
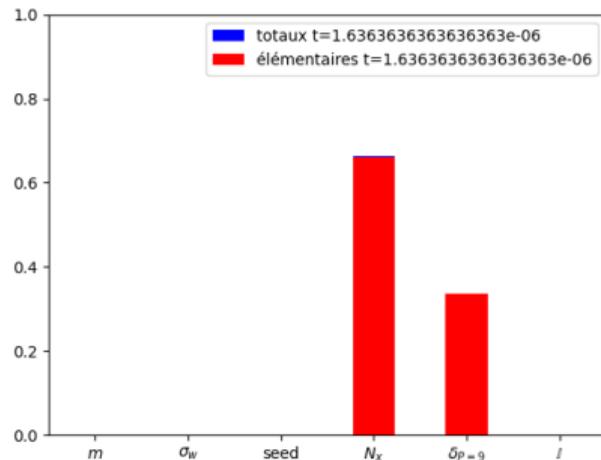
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ✕)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

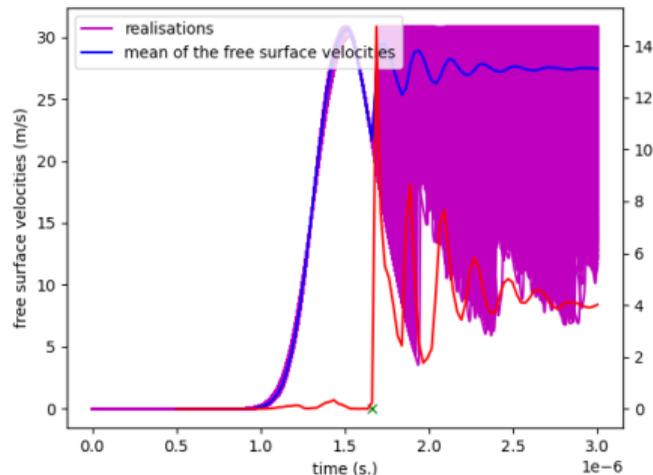
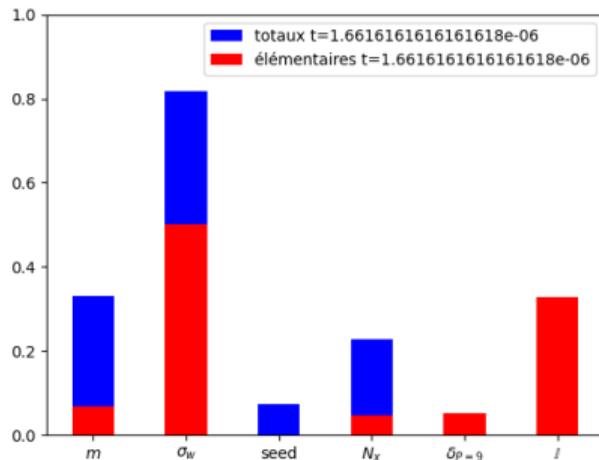
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

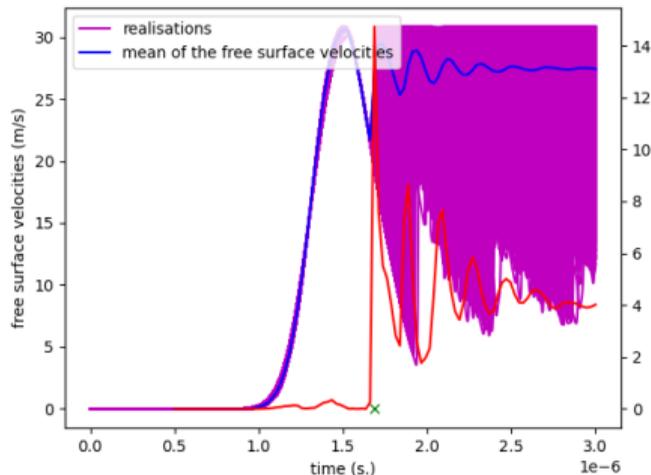
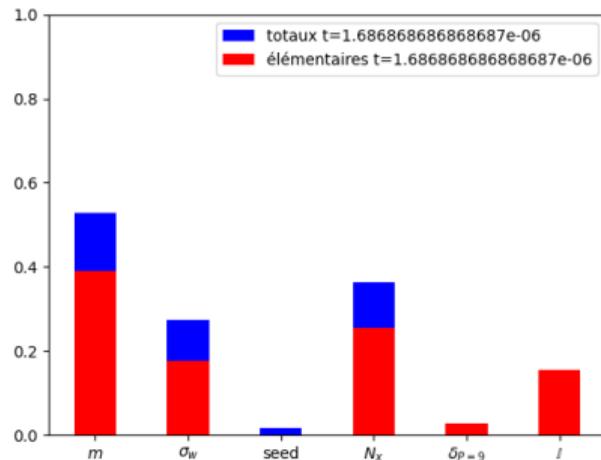
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  a + d'influence que  $seed$  qui ne joue qu'en interaction avec les autres  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

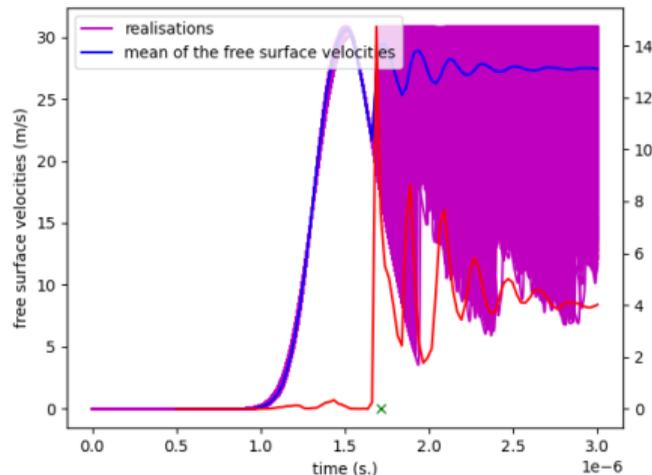
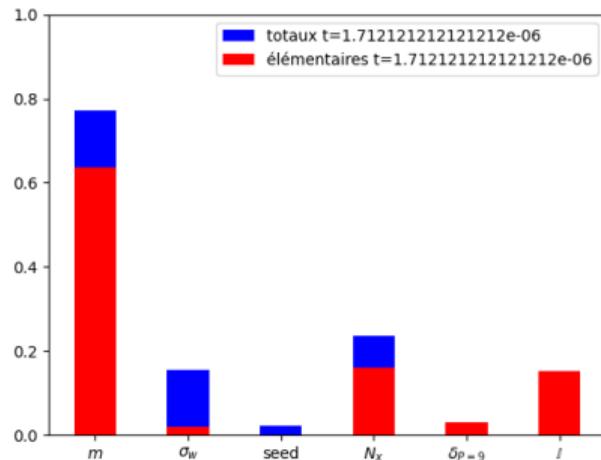
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  a autant d'influence que le paramètre physique le + influent (faible  $\delta\rho$  petit)  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

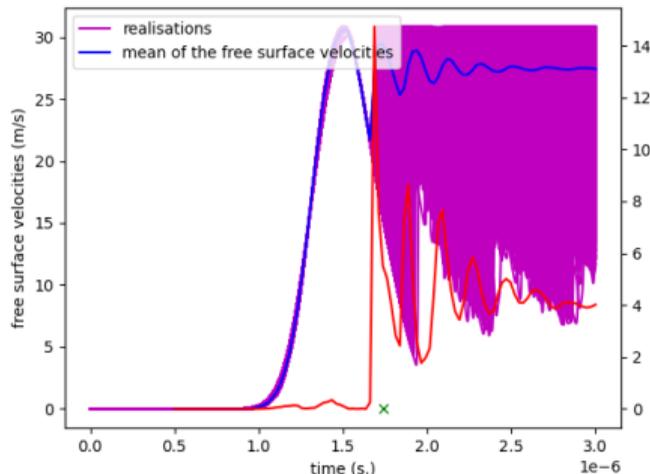
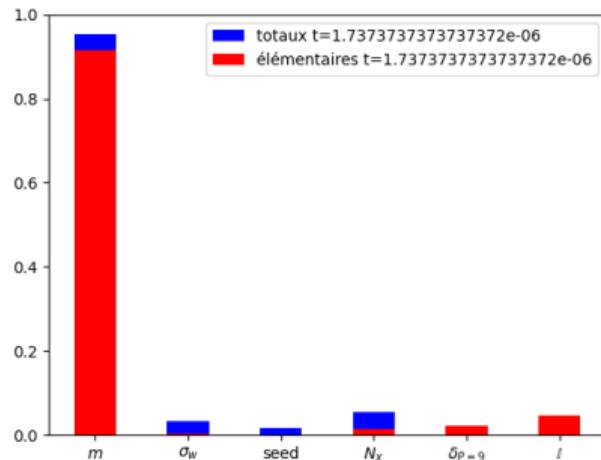
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $m$  semble calibrable dans cette fenêtre temporelle (fiable)  
(le paramètre  $m$  serait calibrable à ce temps... Mais pas les autres)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

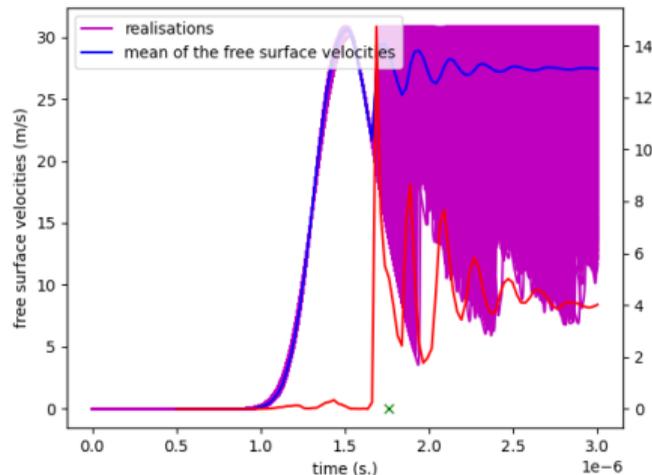
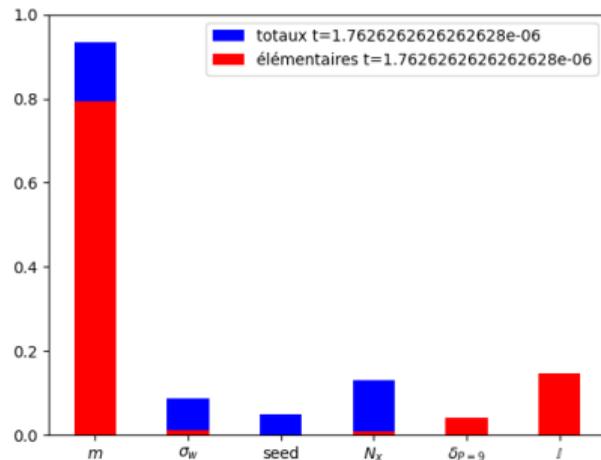
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $m$  semble calibrable dans cette fenêtre temporelle (fiable)  
(le paramètre  $m$  serait calibrable à ce temps... Mais pas les autres)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

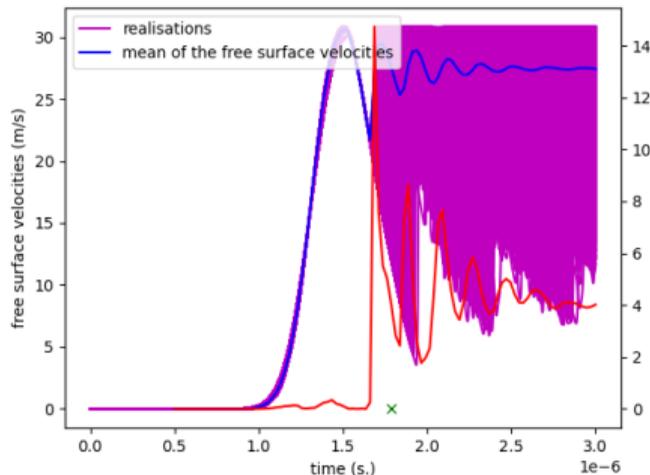
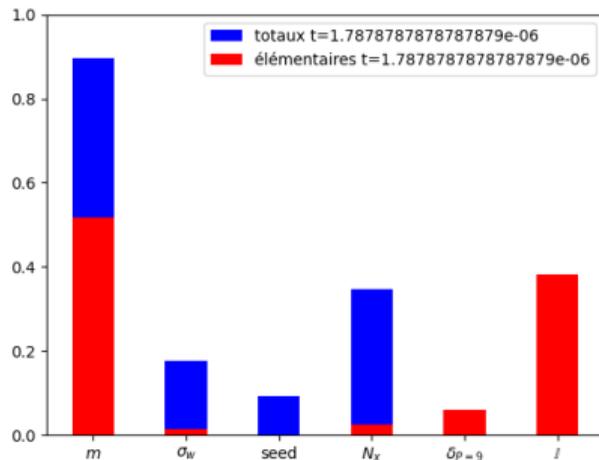
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $m$  semble calibrable dans cette fenêtre temporelle (fiable)  
(le paramètre  $m$  serait calibrable à ce temps... Mais pas les autres)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

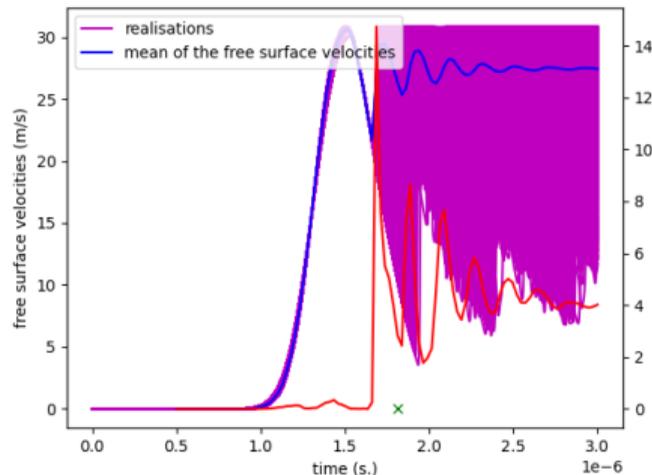
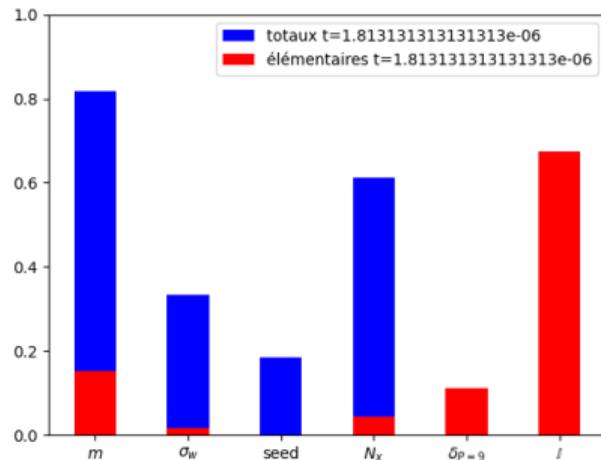
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $m$  semble calibrable dans cette fenêtre temporelle (fiable)  
(le paramètre  $m$  serait calibrable à ce temps... Mais pas les autres)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

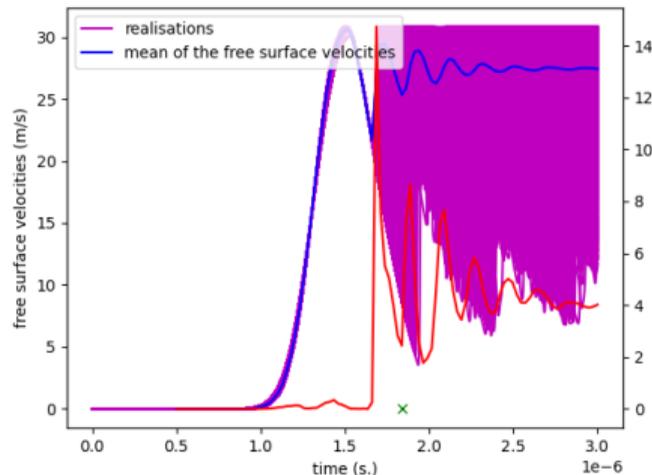
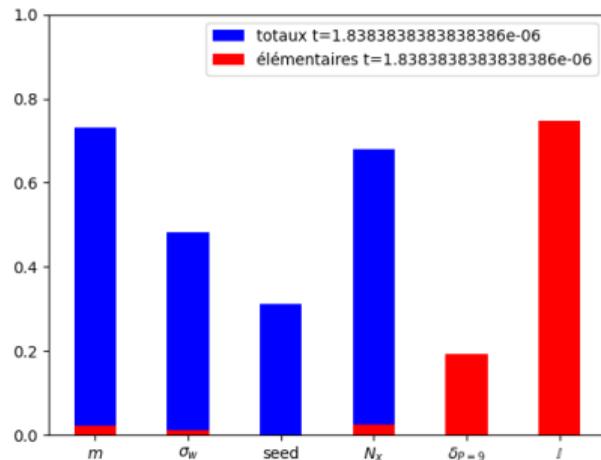
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

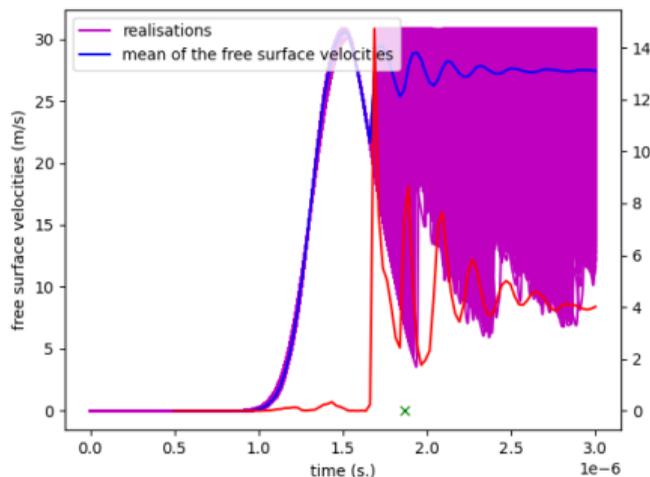
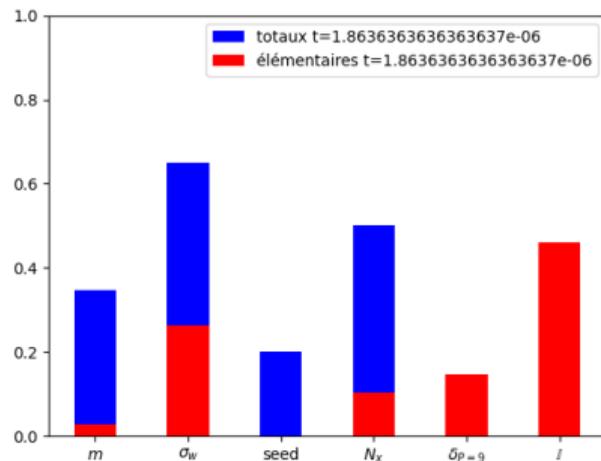
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

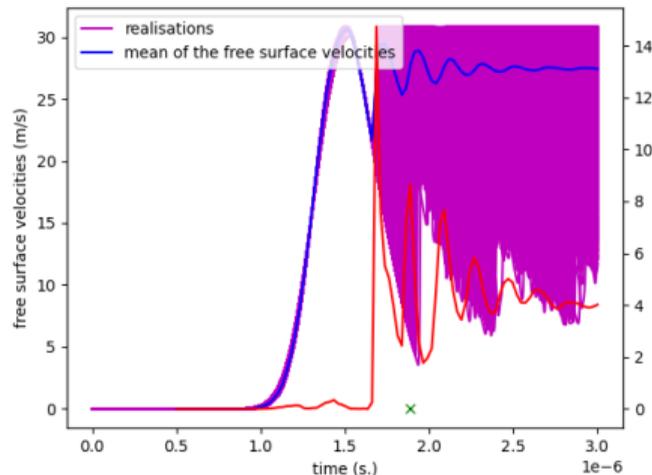
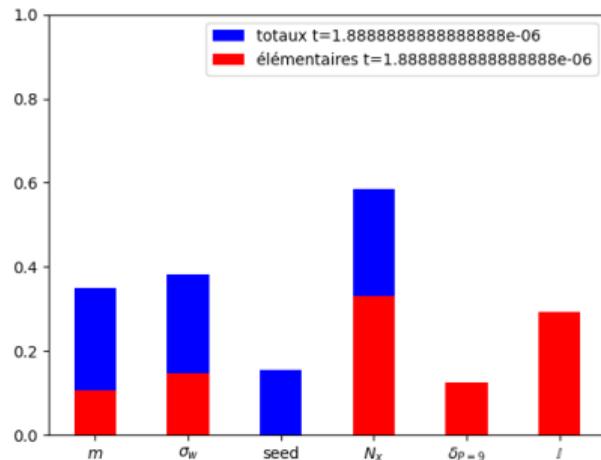
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

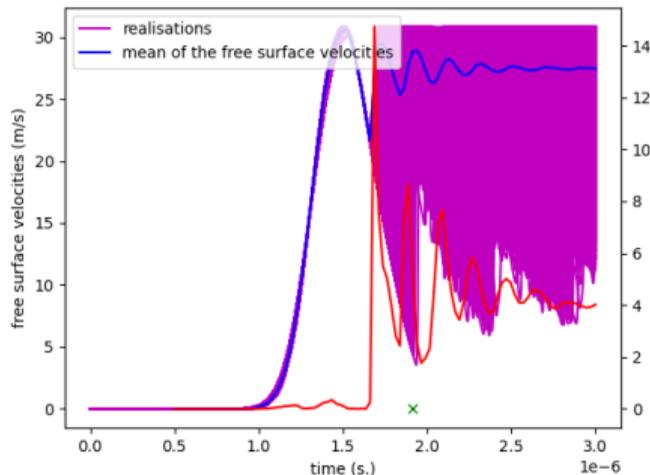
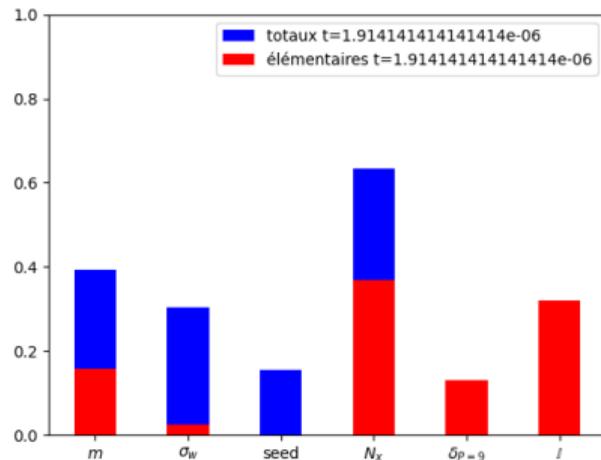
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

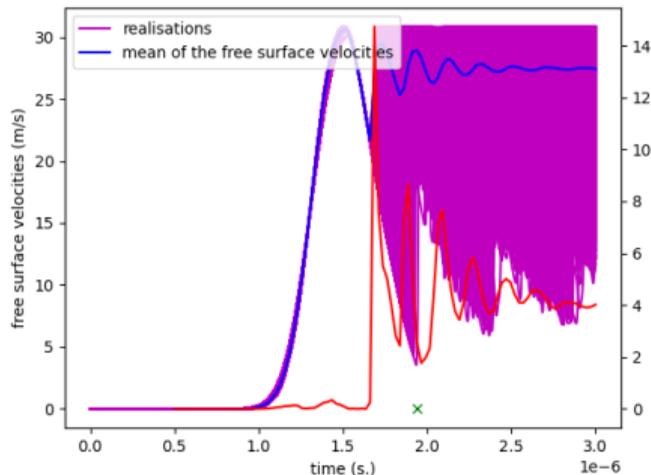
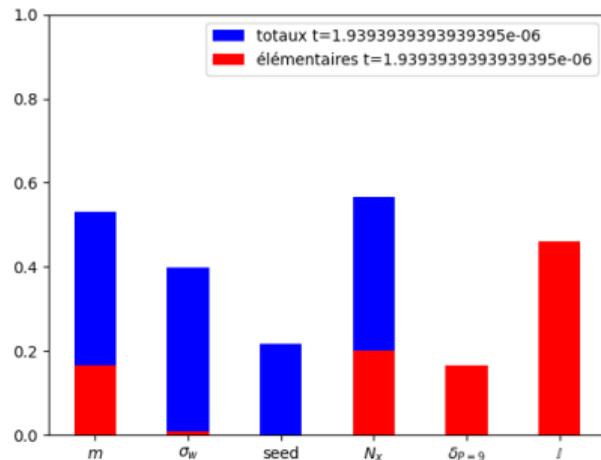
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

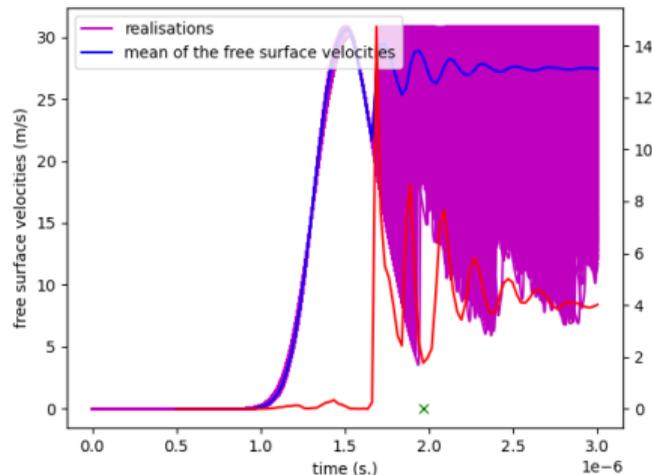
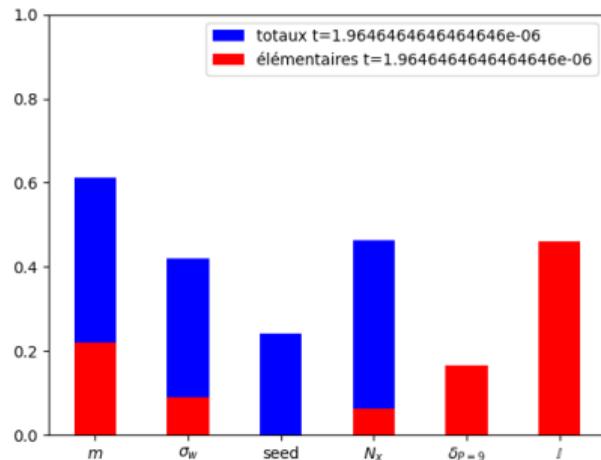
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

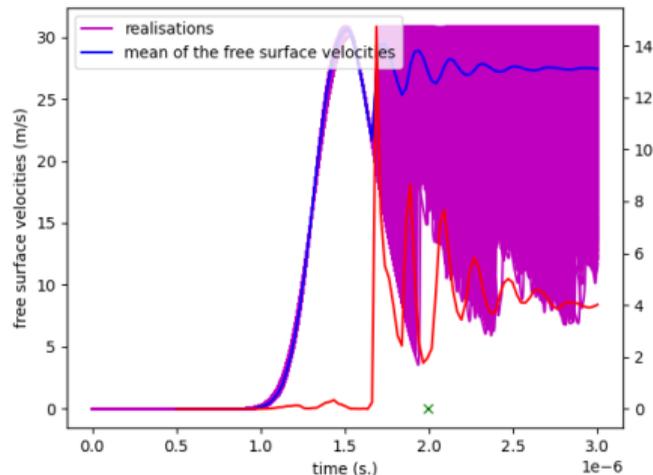
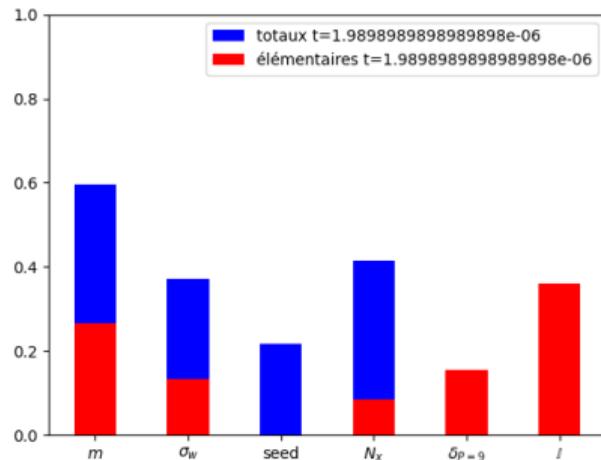
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

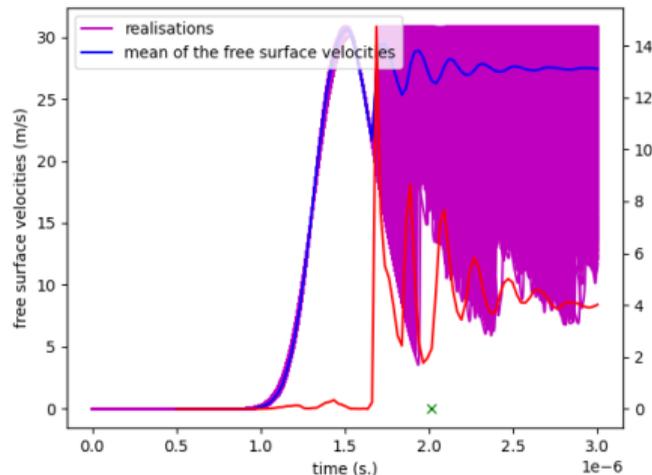
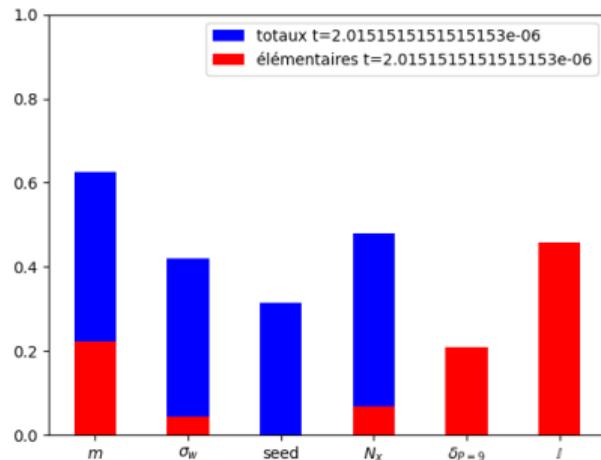
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

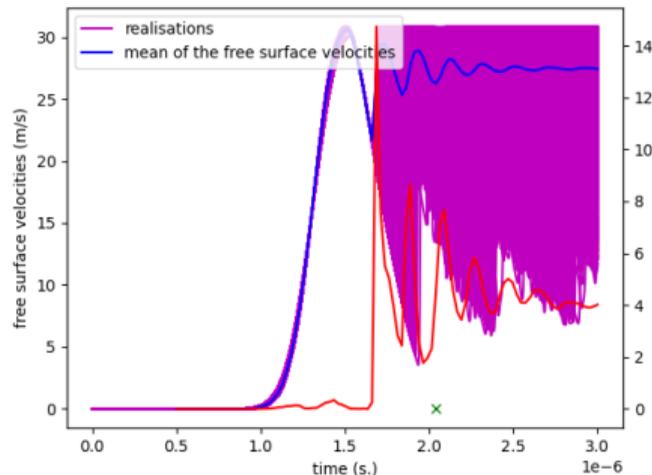
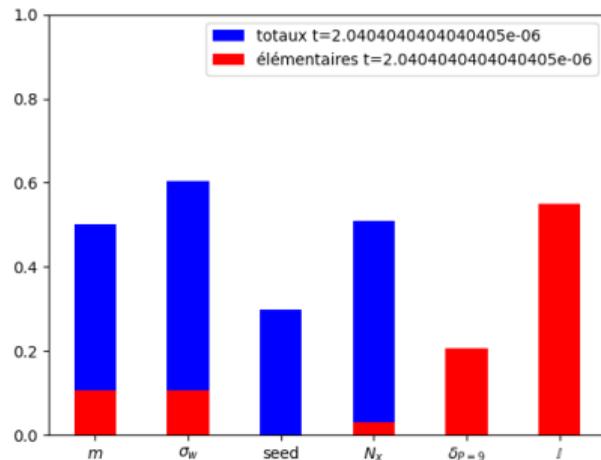
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

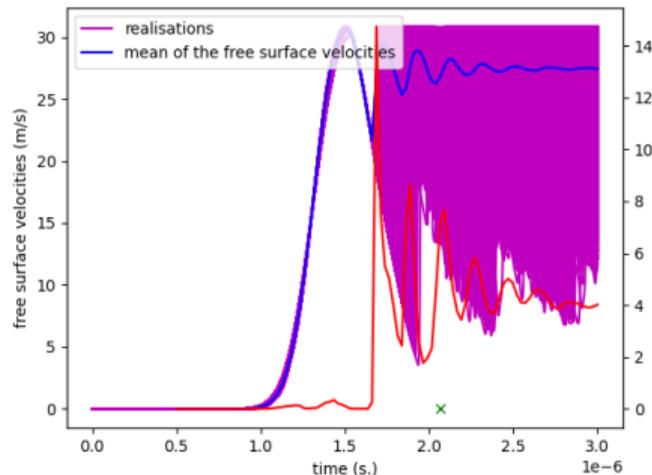
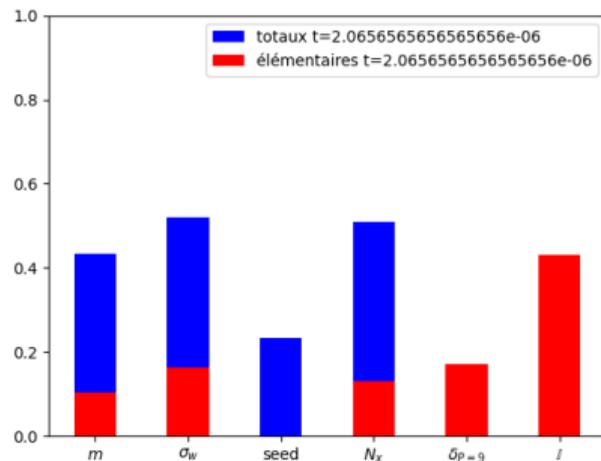
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

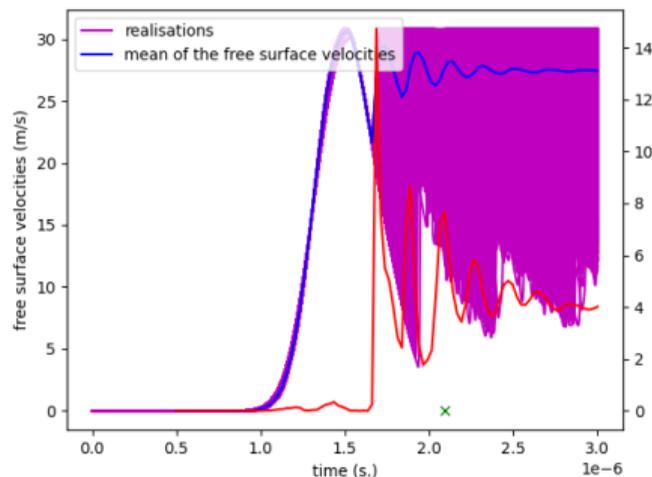
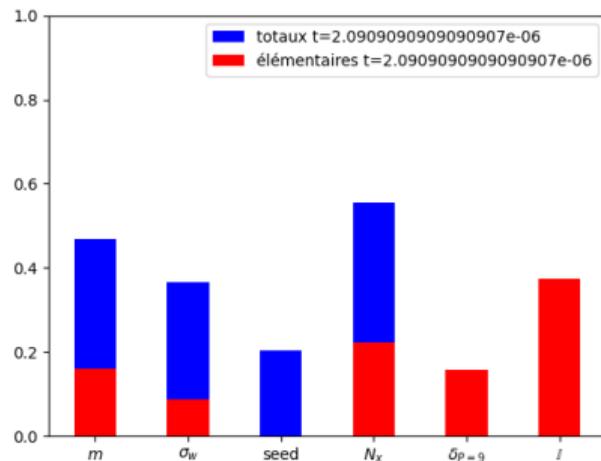
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

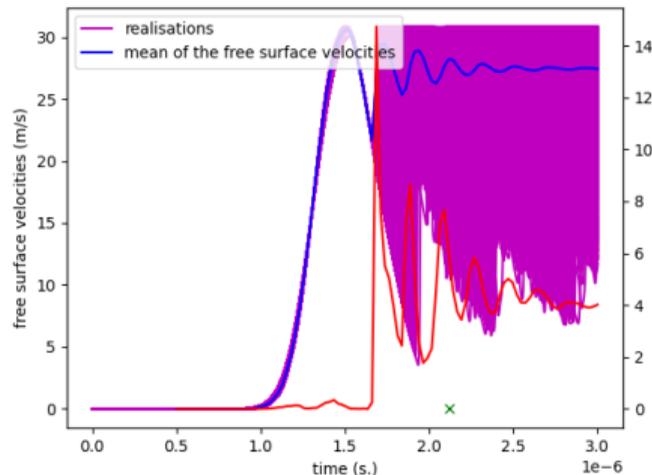
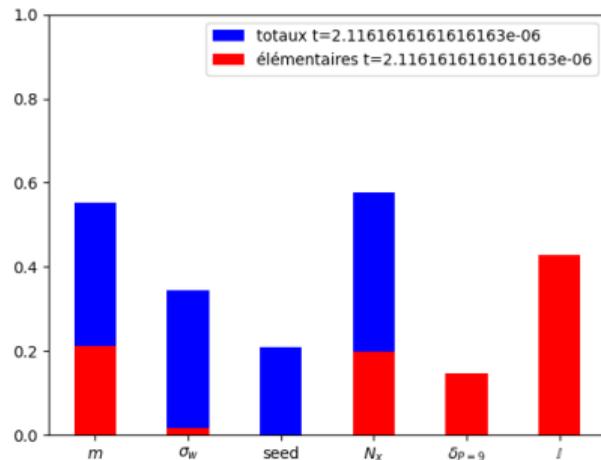
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

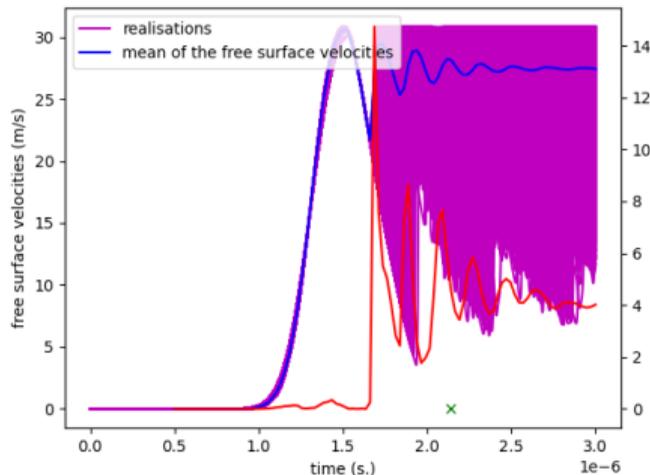
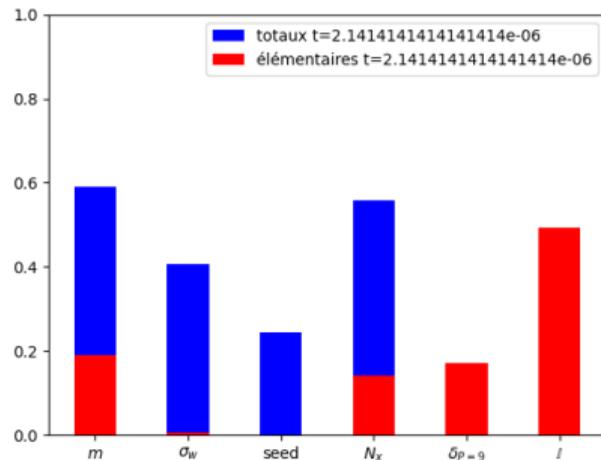
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

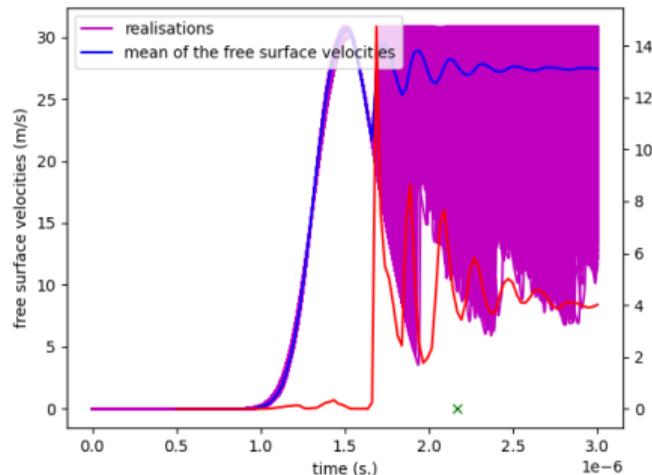
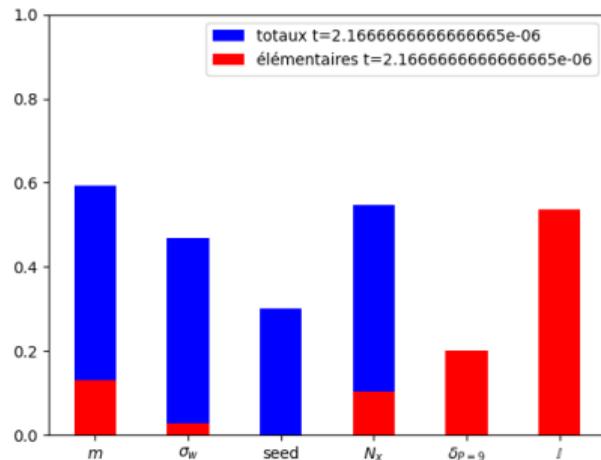
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

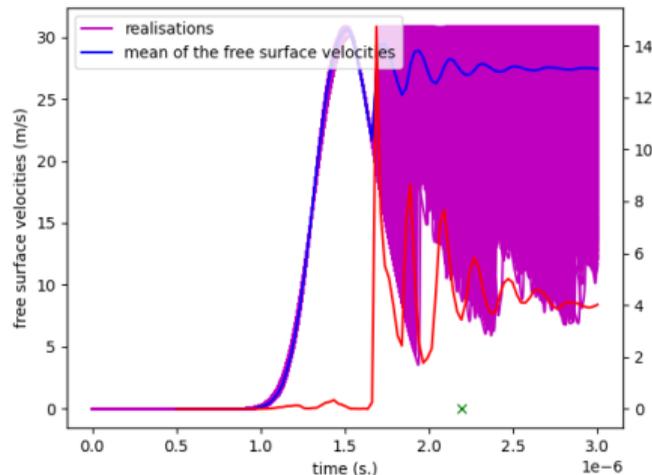
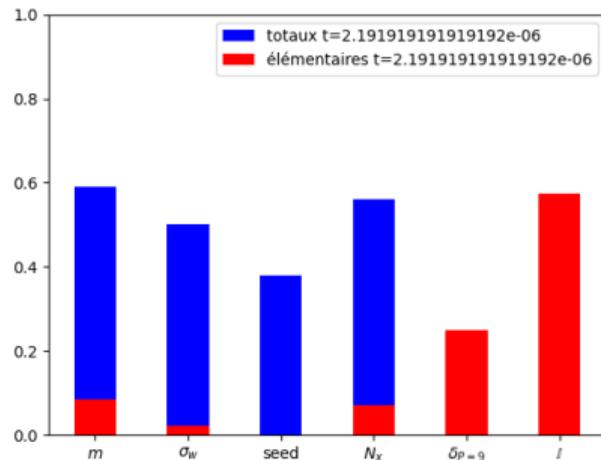
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

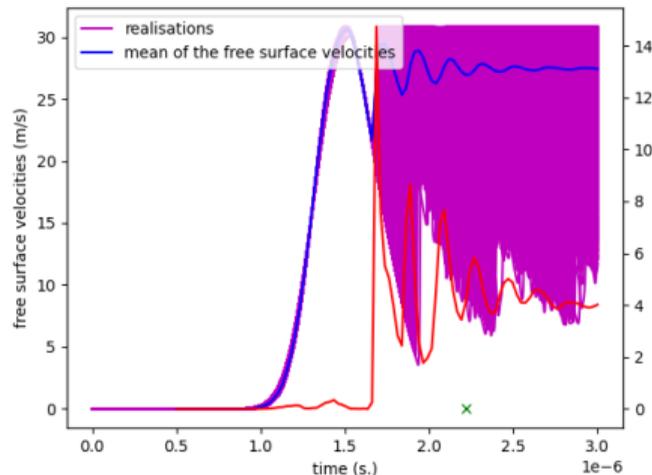
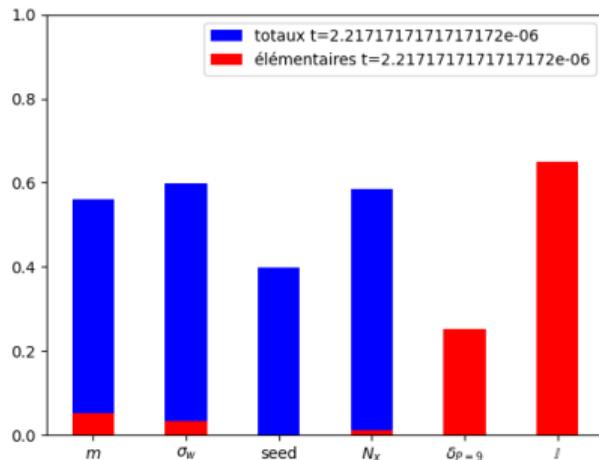
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

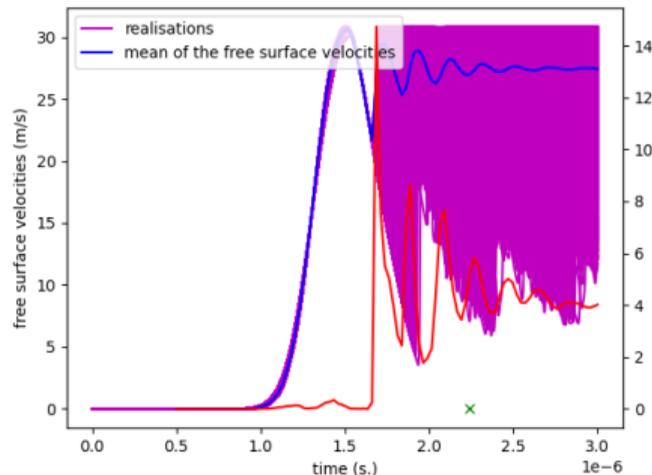
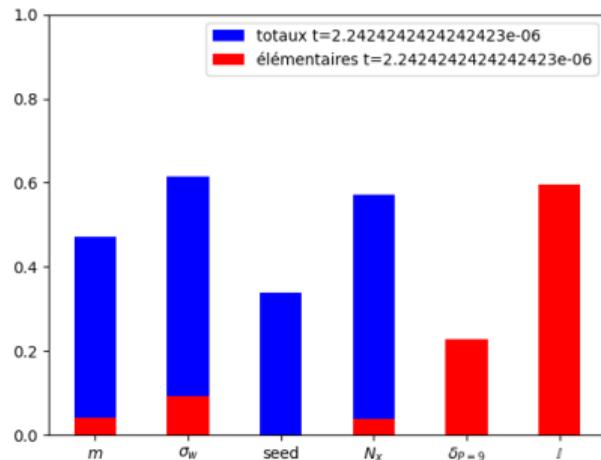
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

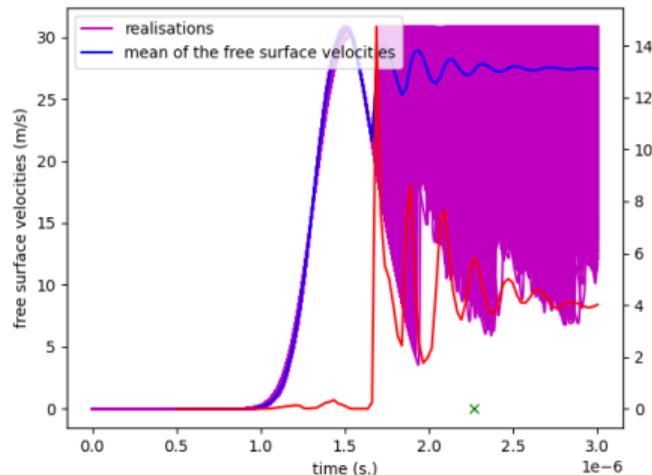
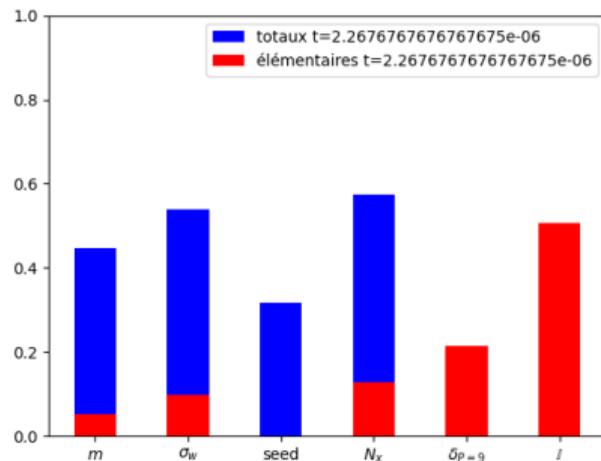
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

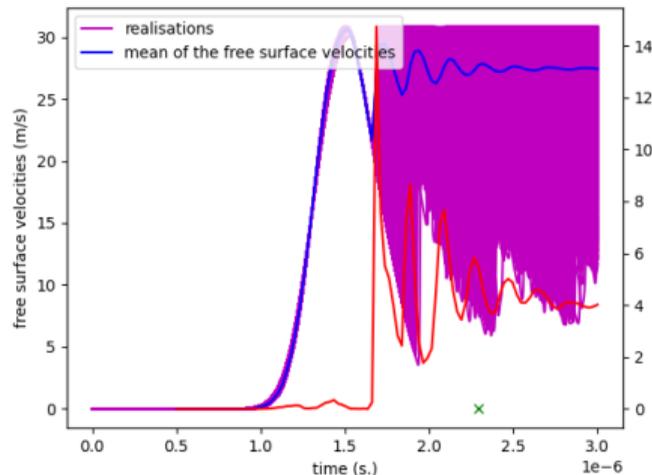
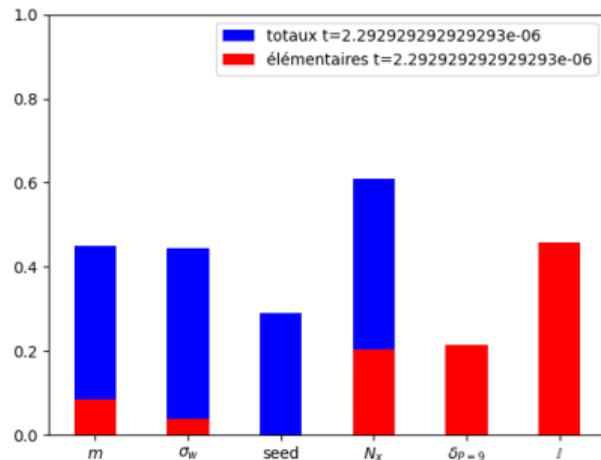
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

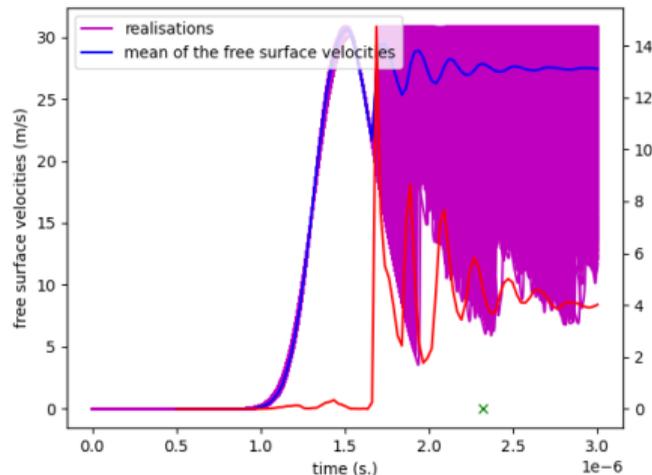
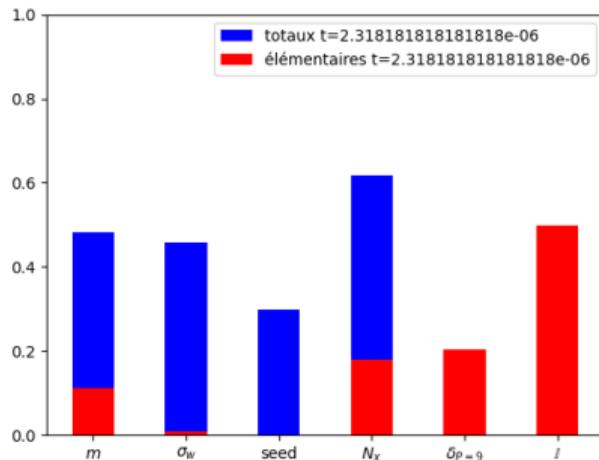
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

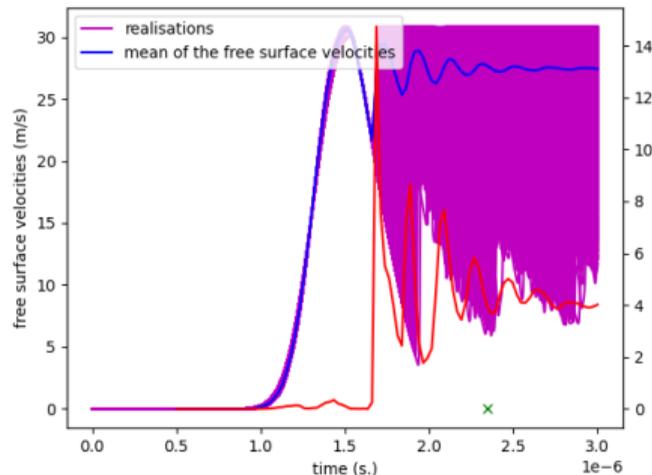
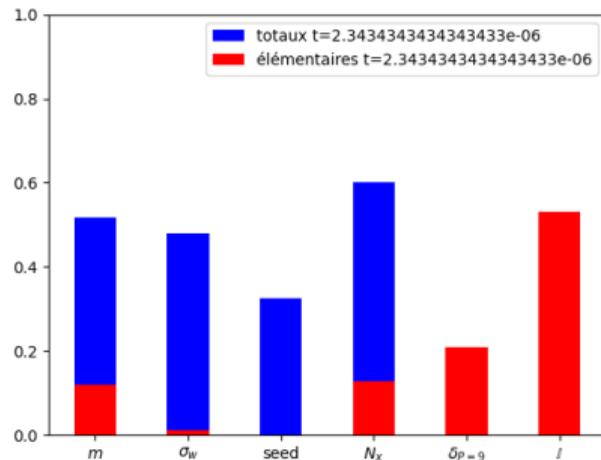
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

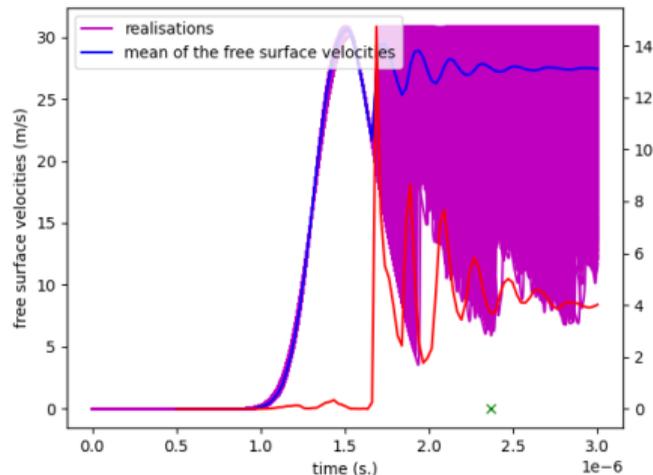
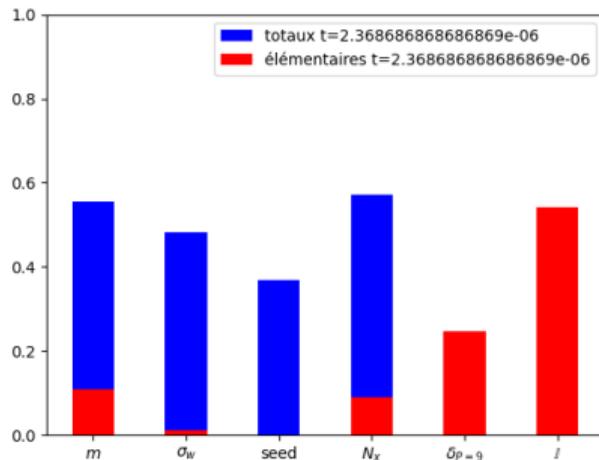
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

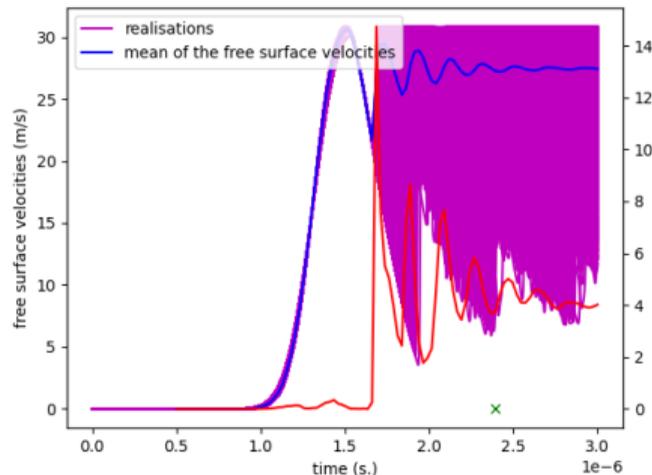
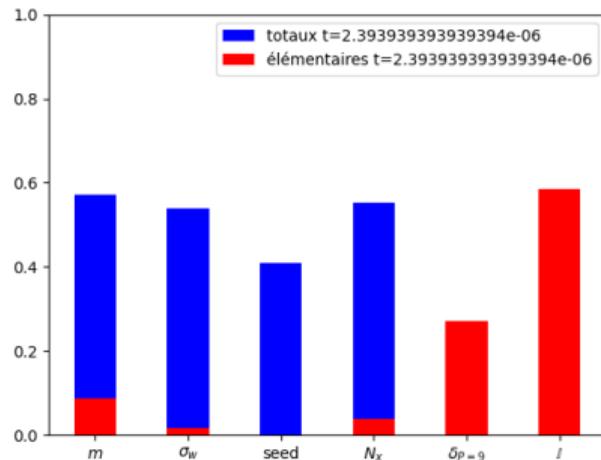
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

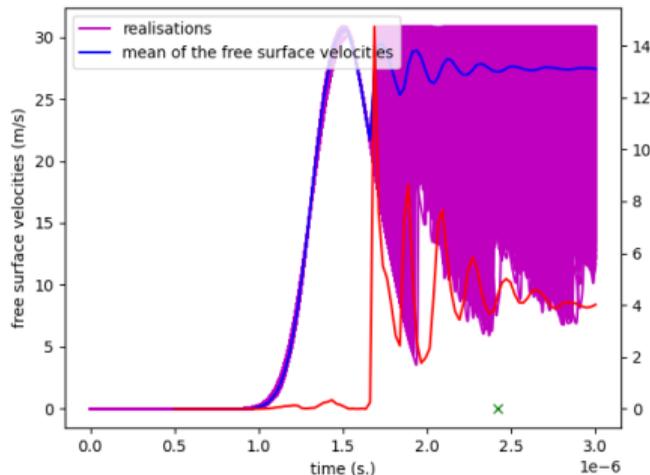
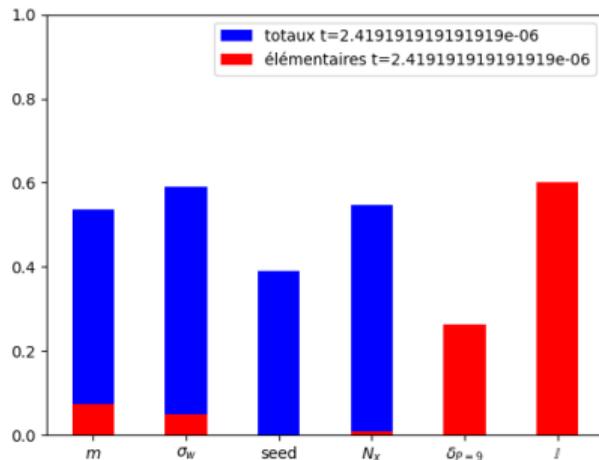
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

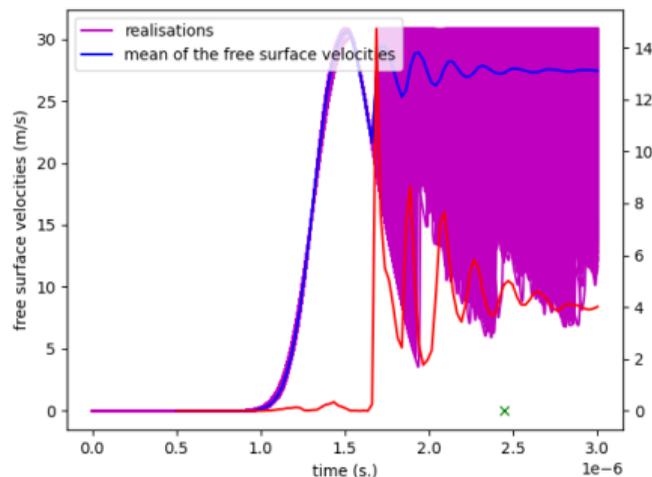
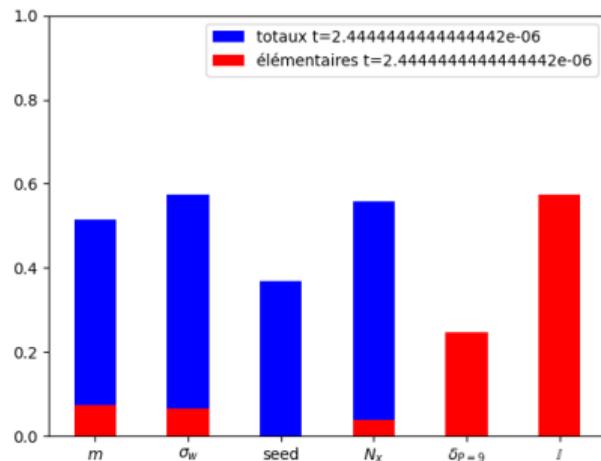
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

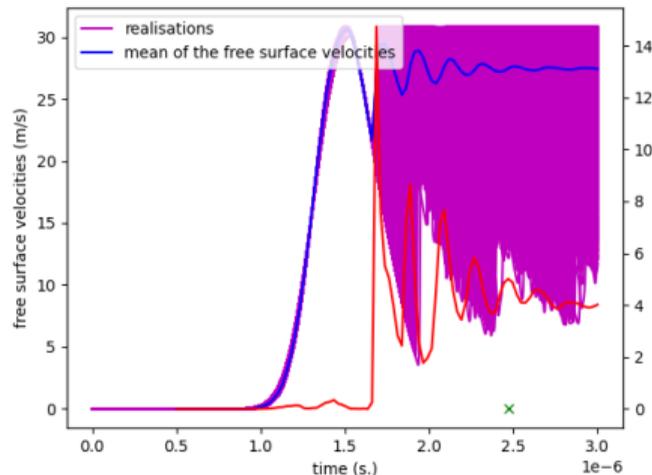
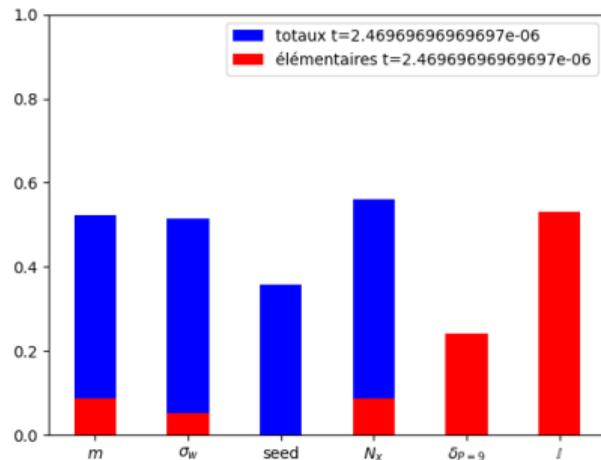
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

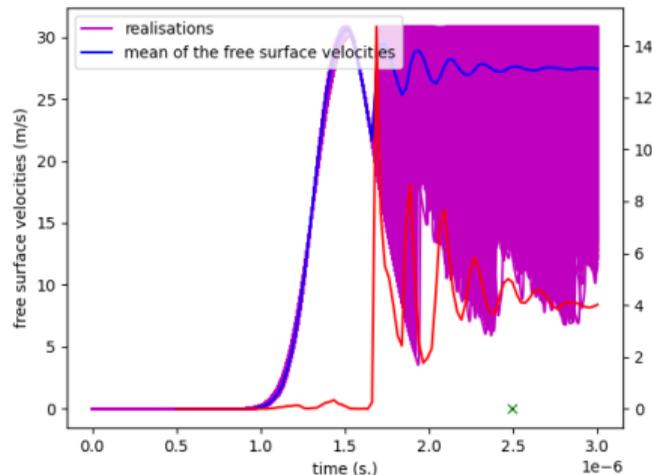
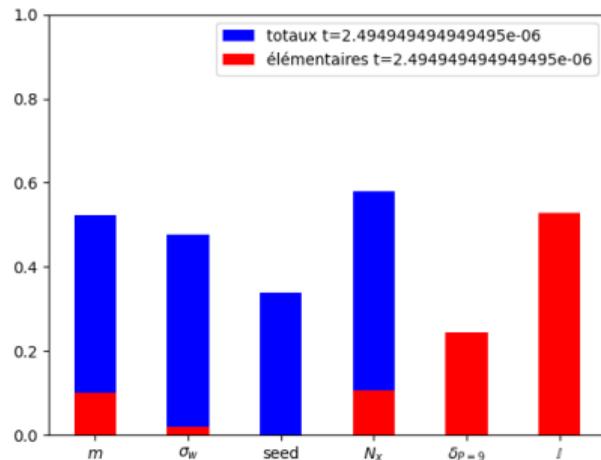
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

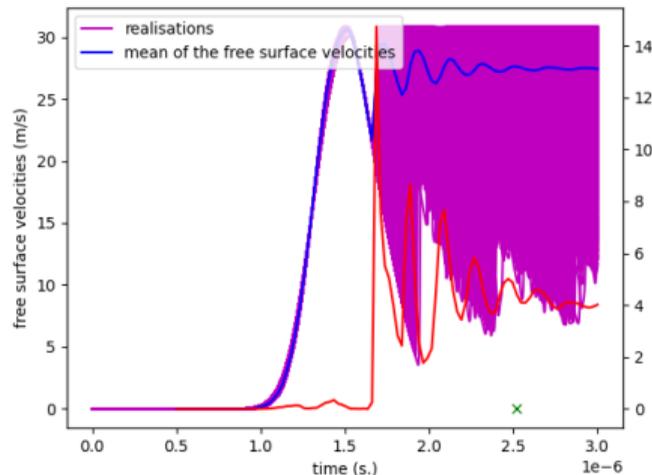
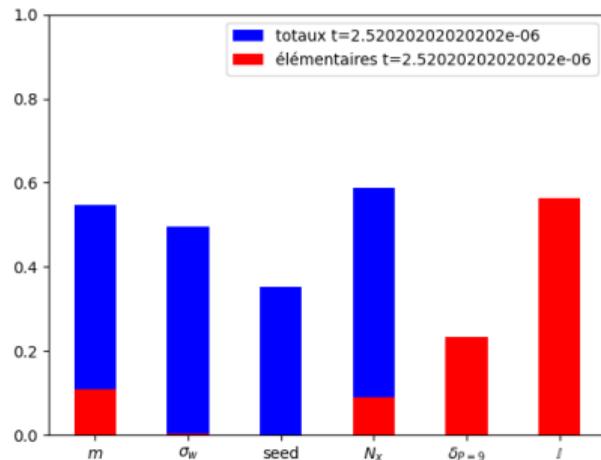
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

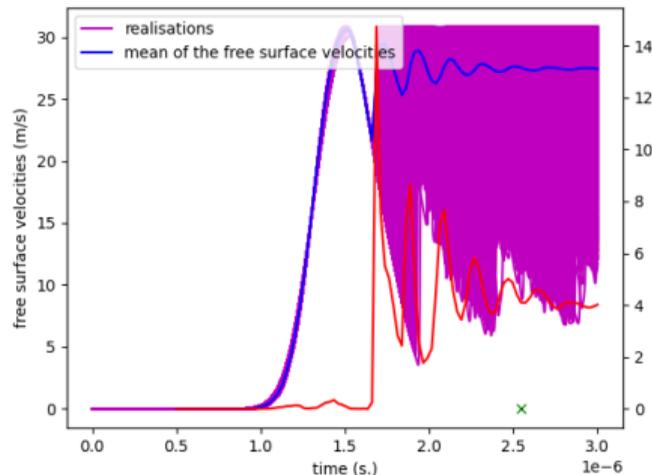
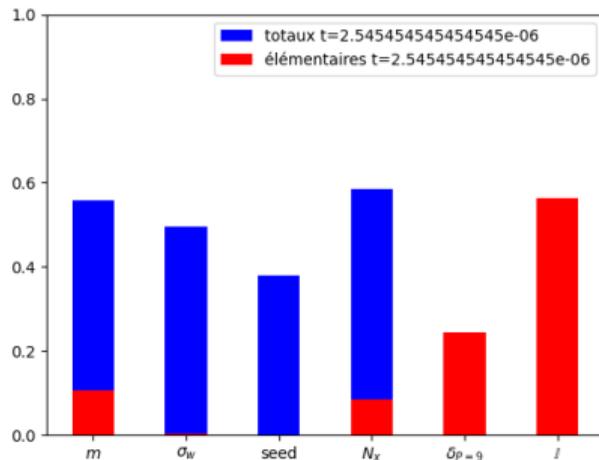
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

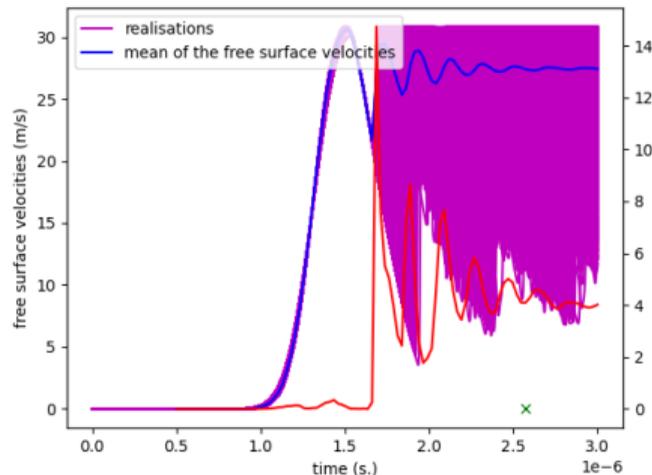
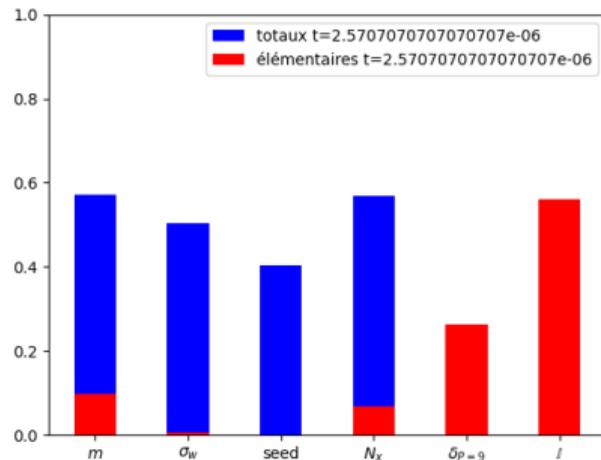
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

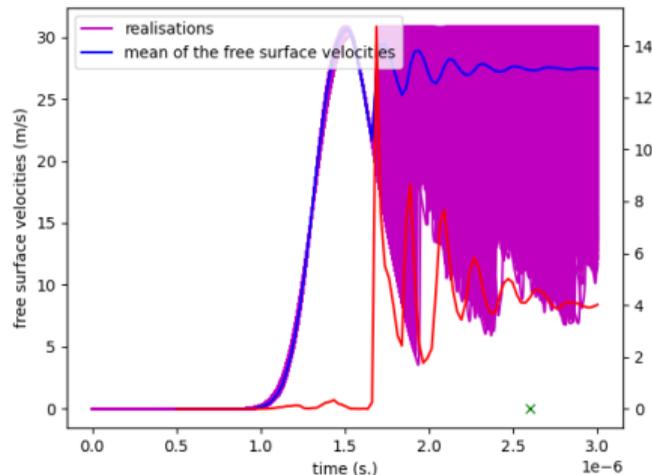
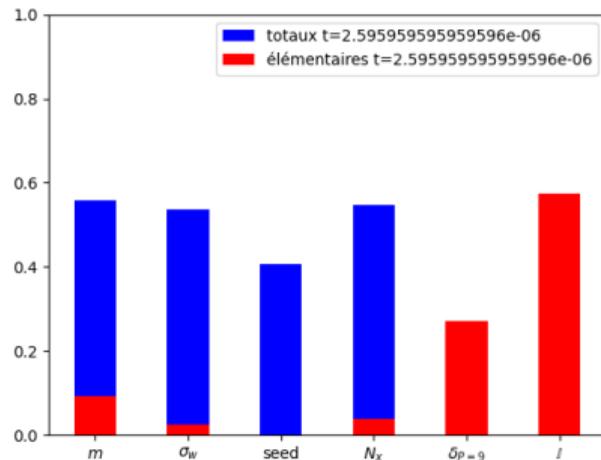
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

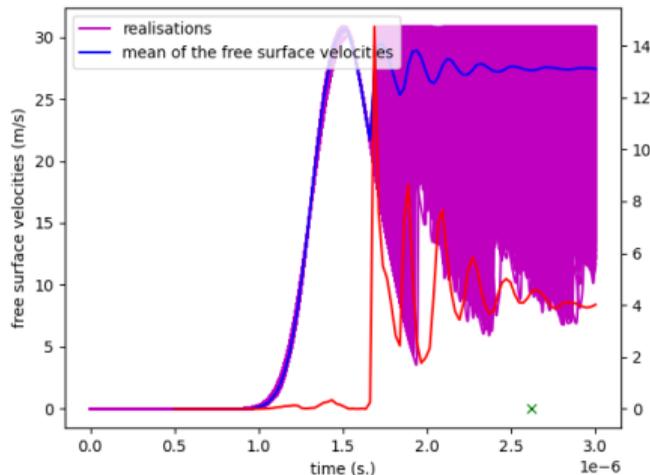
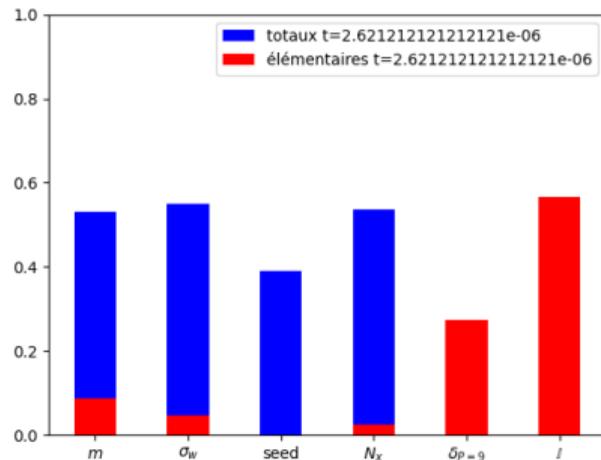
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

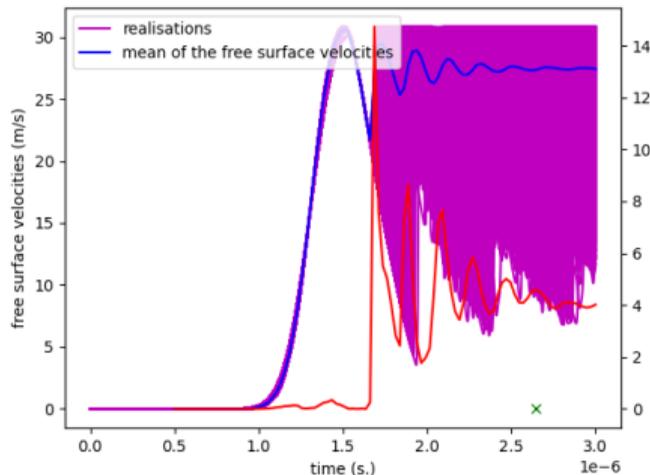
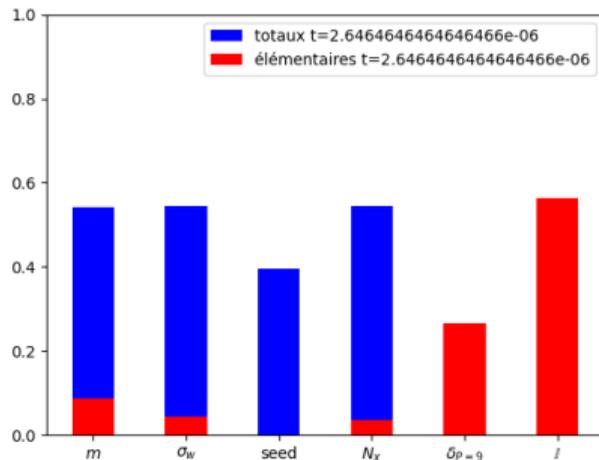
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

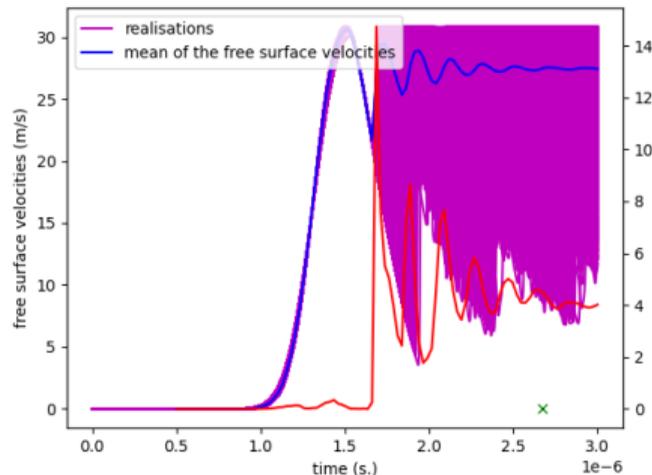
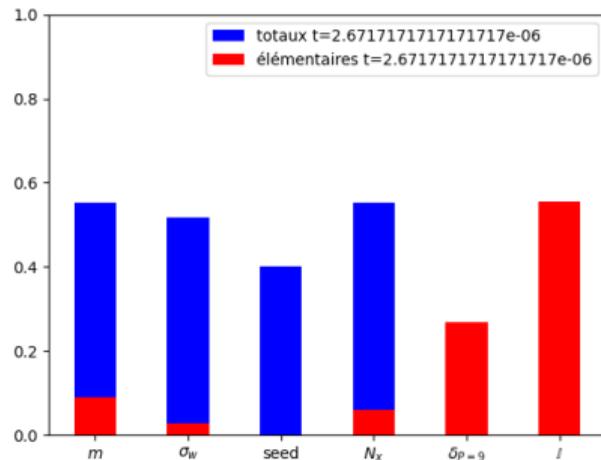
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

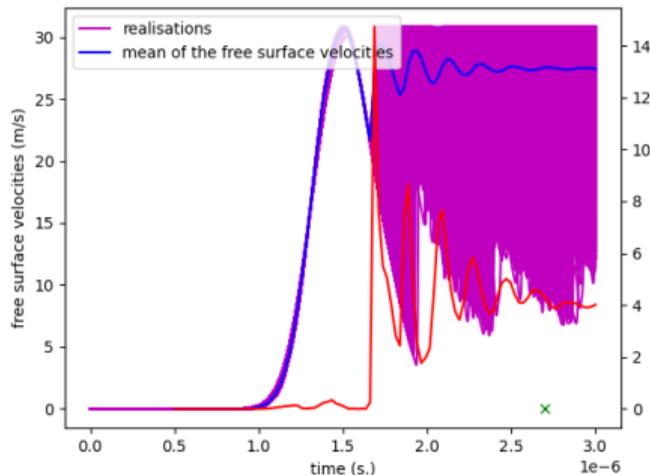
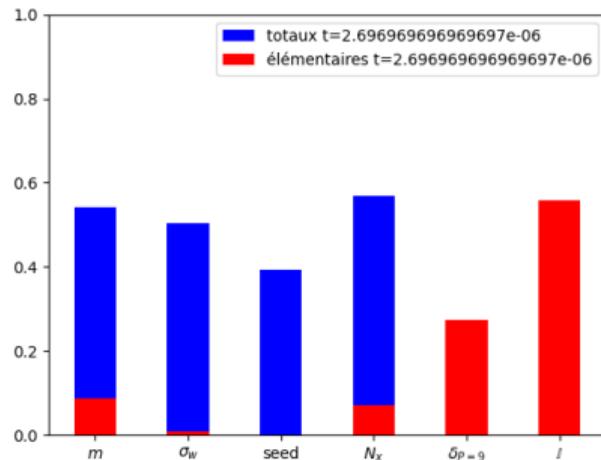
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

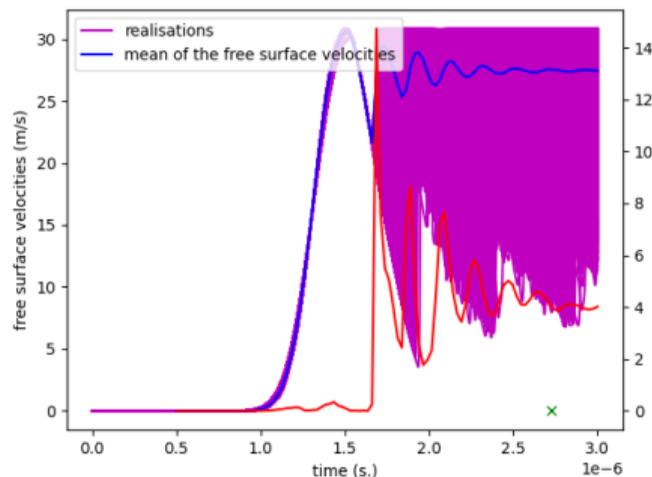
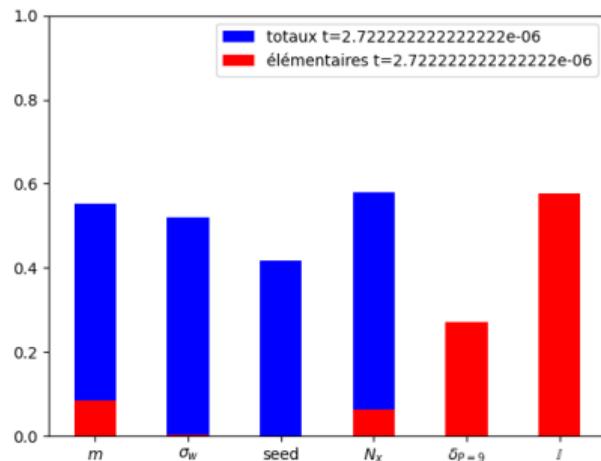
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

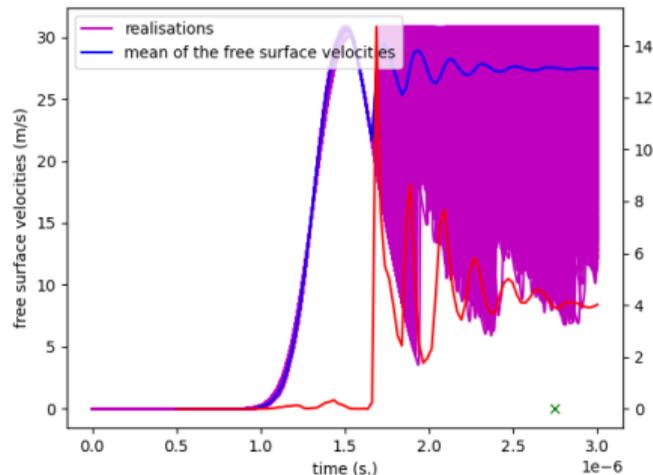
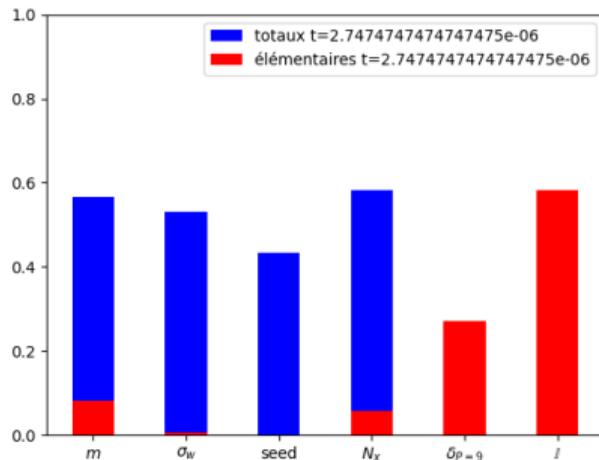
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

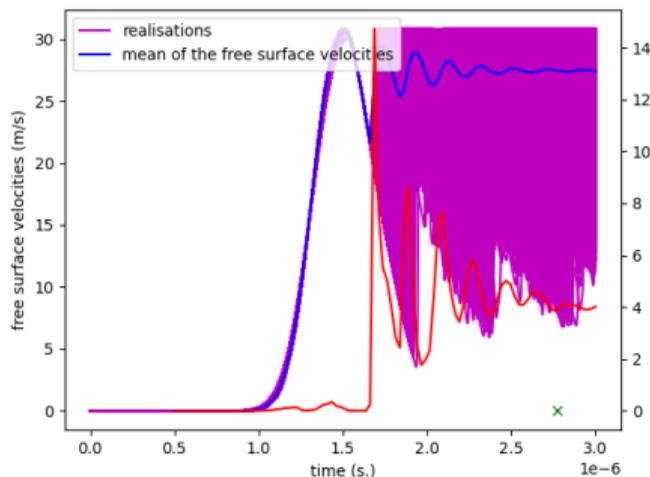
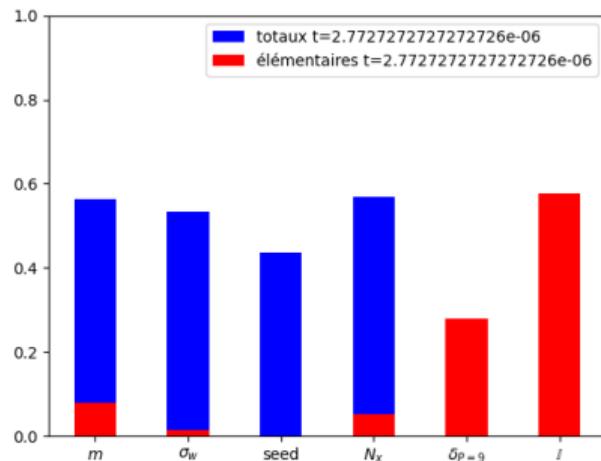
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

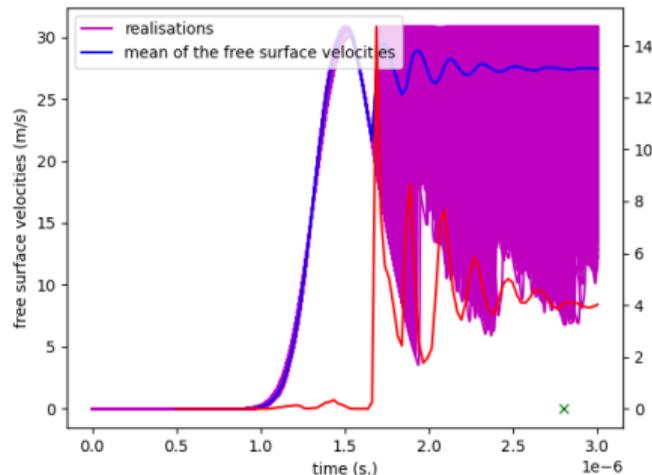
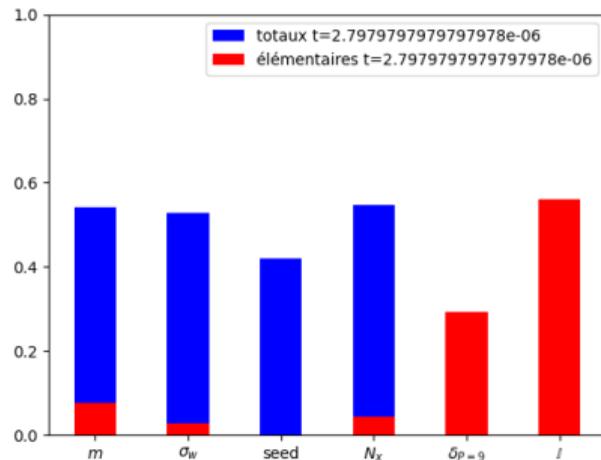
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

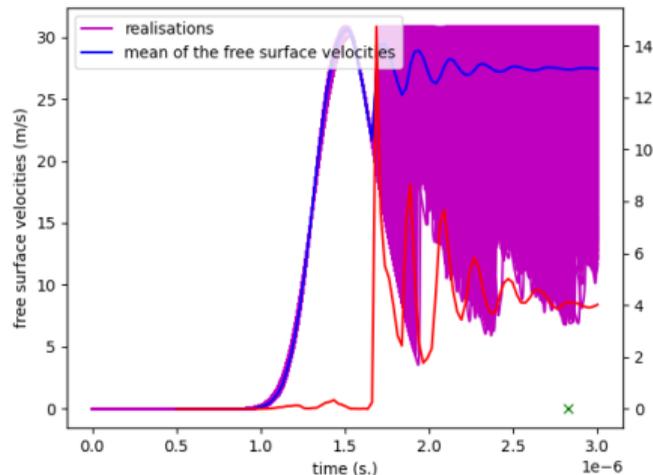
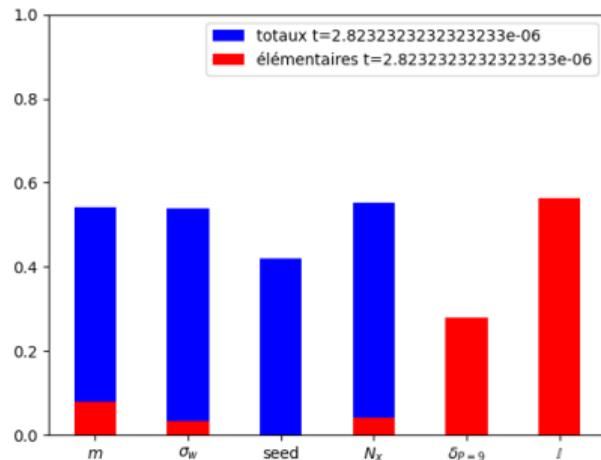
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

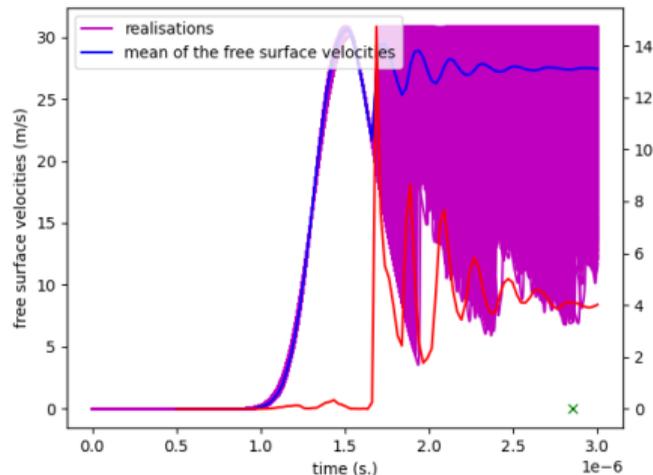
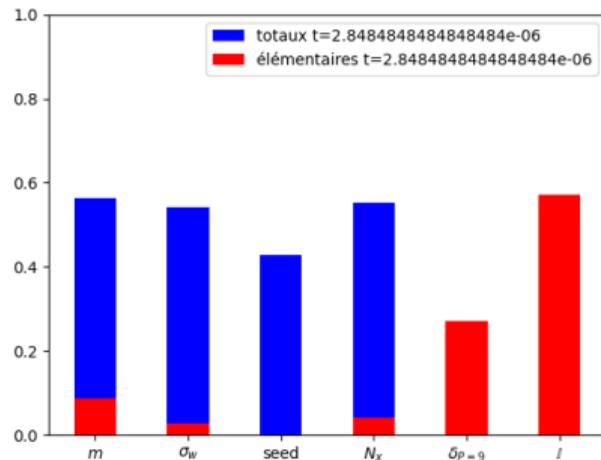
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

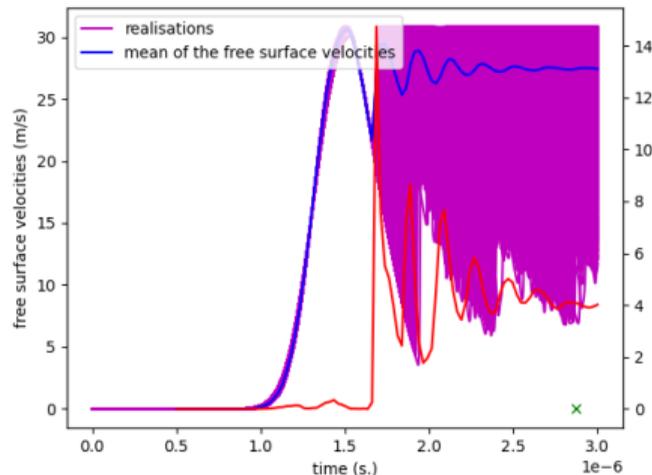
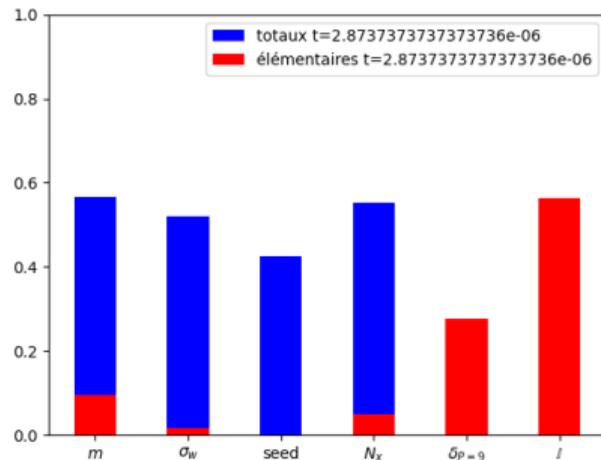
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

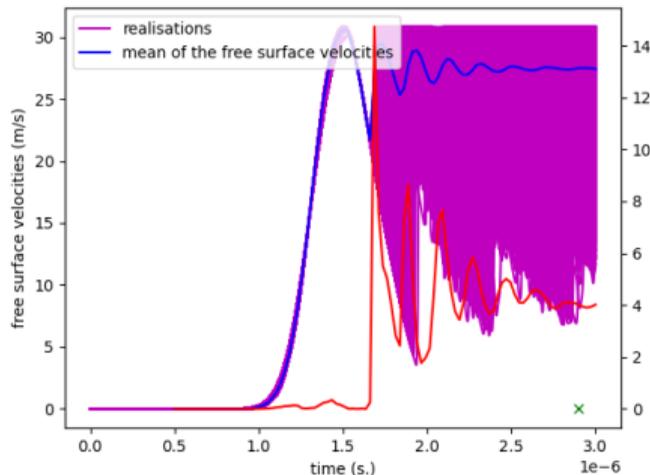
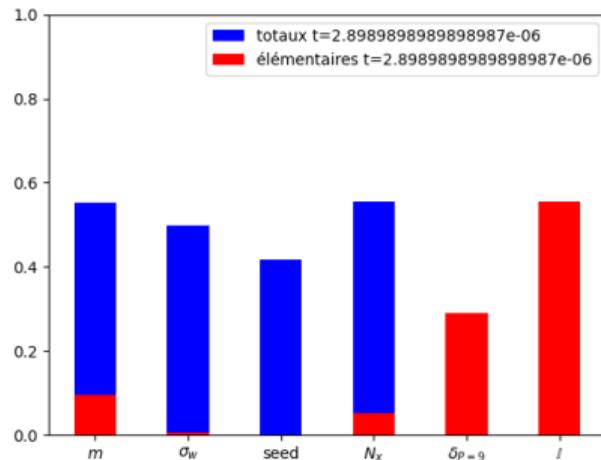
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

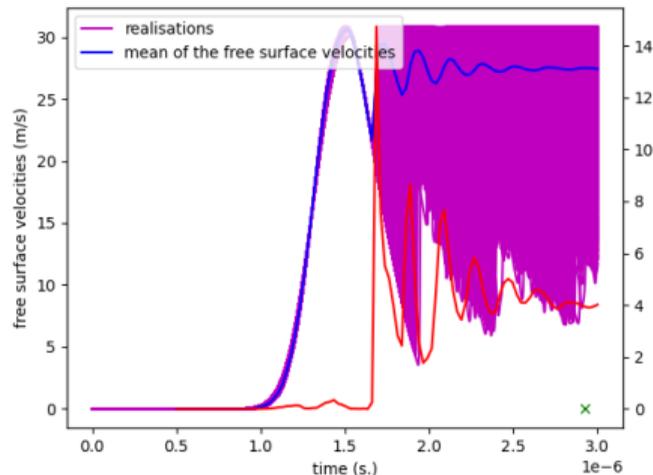
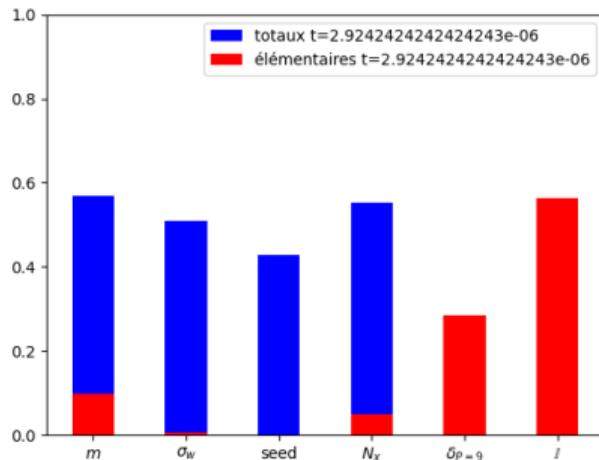
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

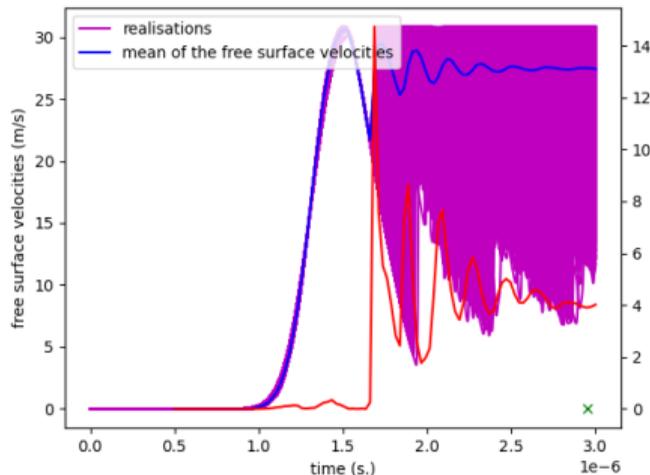
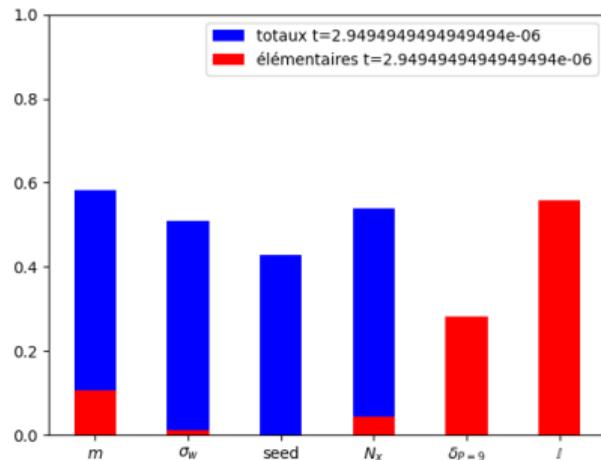
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

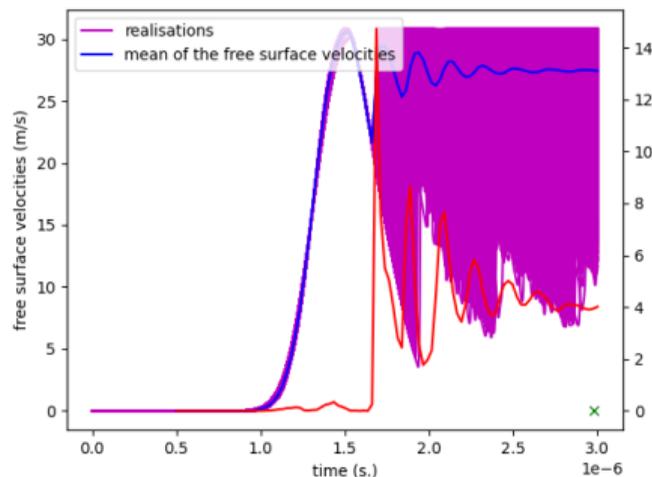
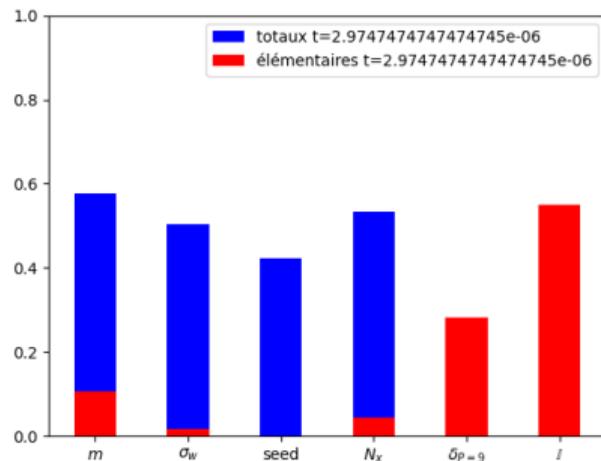
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX en fonction du temps

(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps x)



Endo. actif:  $N_x$  est autant voire + influent que les paramètres physiques!  
(comportement problématique)

# Travail sur le choix du pas de maillage

Bilan de l'analyse de sensibilité globale

**Pour nos applications, i.e.**

- dans les gammes de sollicitation qui nous intéressent,
- pour les géométries/configurations qui nous intéressent

XXX est *globalement* trop sensible au maillage

(cf. "**comportement problématique**" sur les slides précédents)

(le risque: calibrer le maillage plutôt que les paramètres physiques)

Mais XXX reste un modèle un **excellent modèle** sur bien des points...

(modèle complet elasto-plastique, endommagement en traction/tension, dépendance en  $\dot{\epsilon}$ ...)

⇒ (mon) Choix d'être intrusif et d'identifier la(les) source(s) de non-cv dans XXX

(+ retour sur analyse de sensibilité globale sur un XXX modifié )

# Travail (intrusif) sur XXX et les sources de non-convergence

(je vous épargne les difficultés techniques)

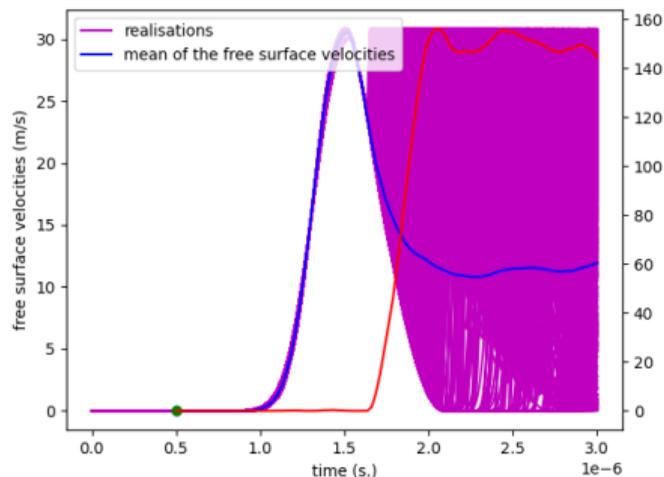
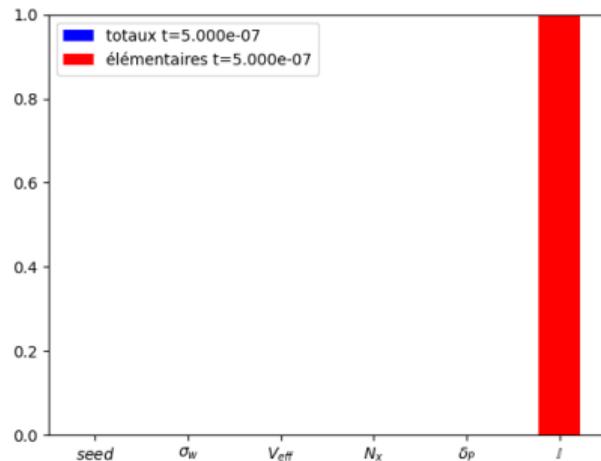
Après un travail conséquent sur XXX:

- Mise en évidence de bugs mineurs  
(également présents dans d'autres implémentations)
- Identification de la principale source de non-convergence  
(la contrainte à rupture sans corrélation spatiale notamment)
- Identification de points numériques pouvant ralentir la convergence  
(le schéma de discrétisation de la mise à jour de la variable d'endommagement a été modifié)

⇒ Retour sur l'analyse de sensibilité sur la nouvelle mouture de XXX

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

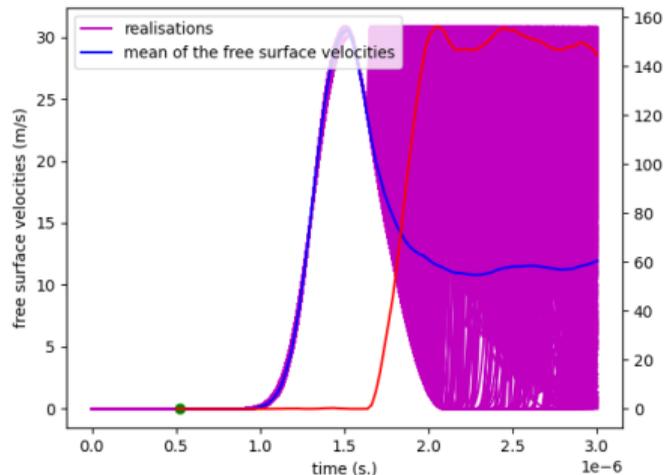
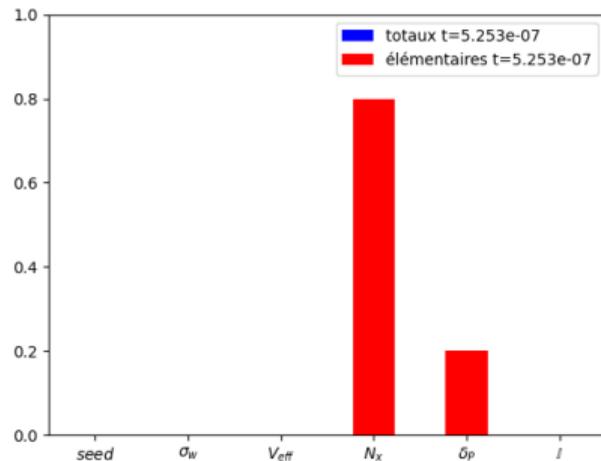
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



(variance nulle: par convention, tout sur les interactions II)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

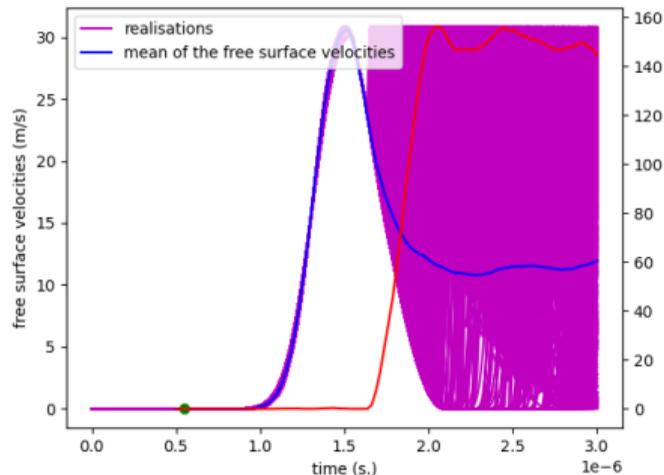
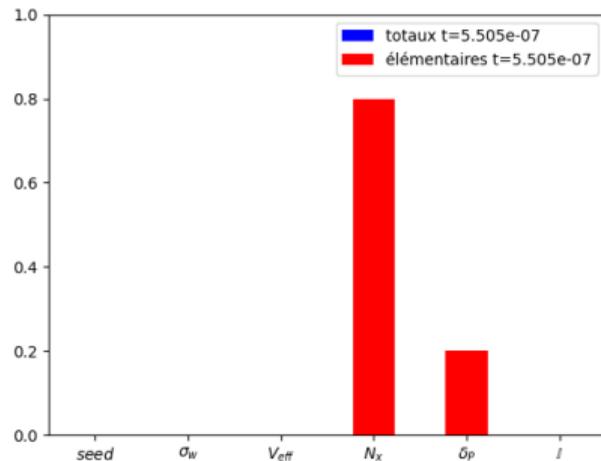
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

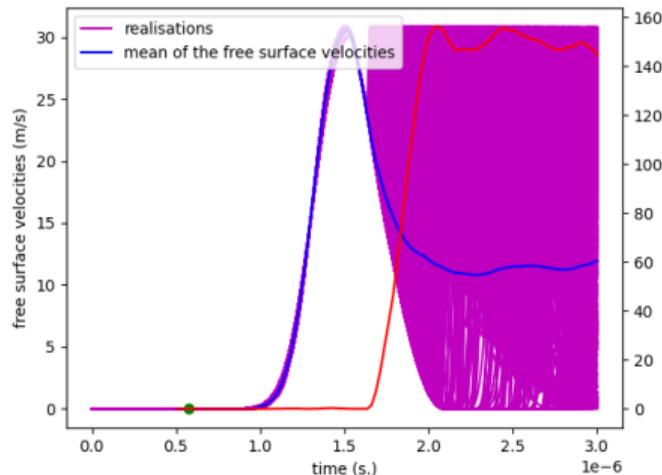
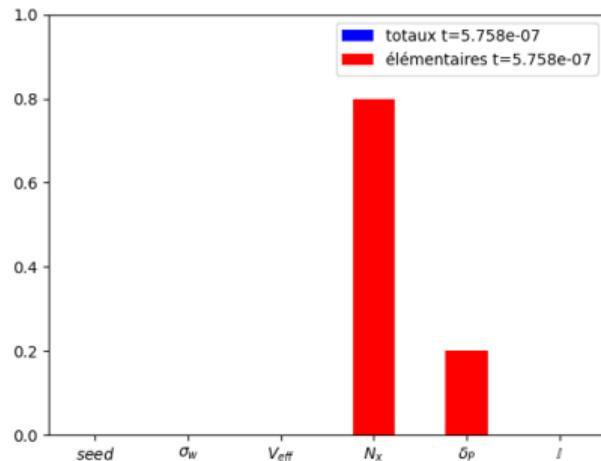
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

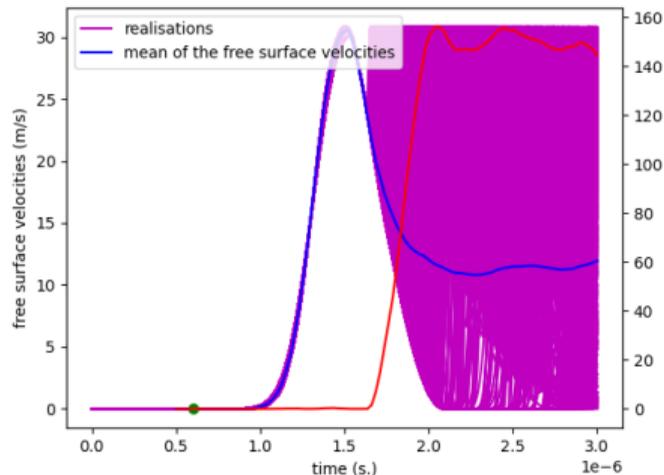
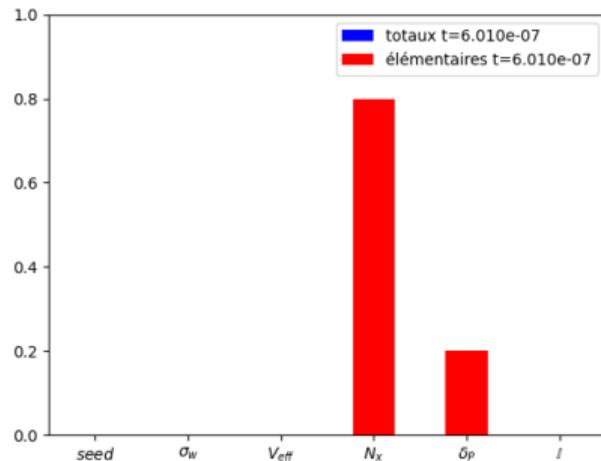
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

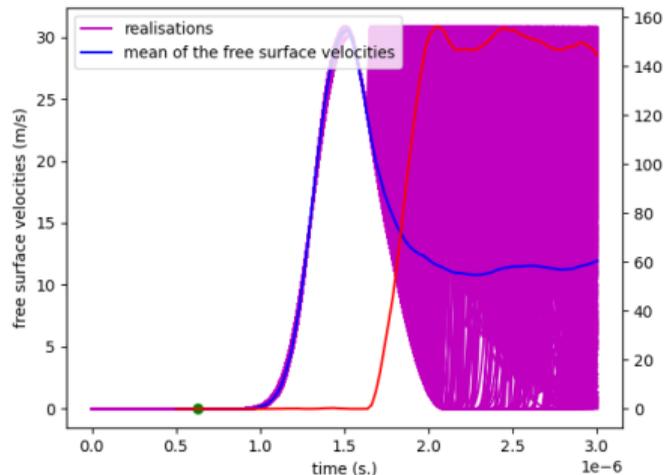
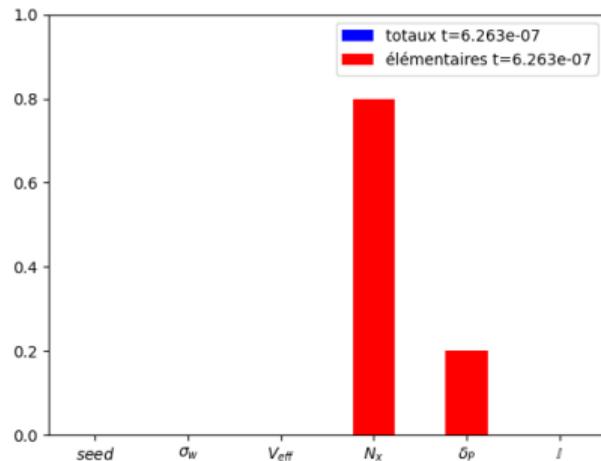
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

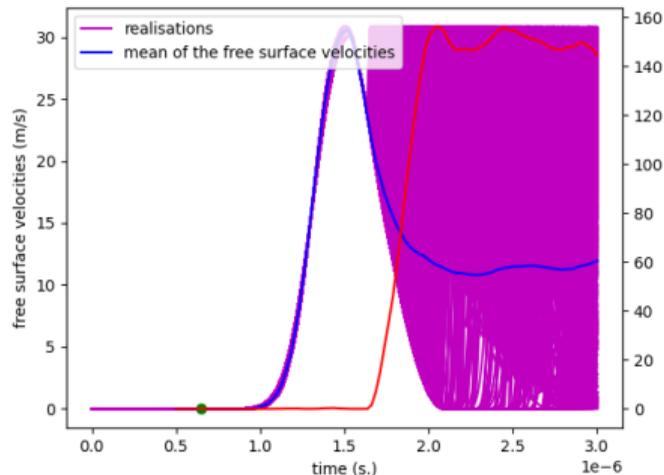
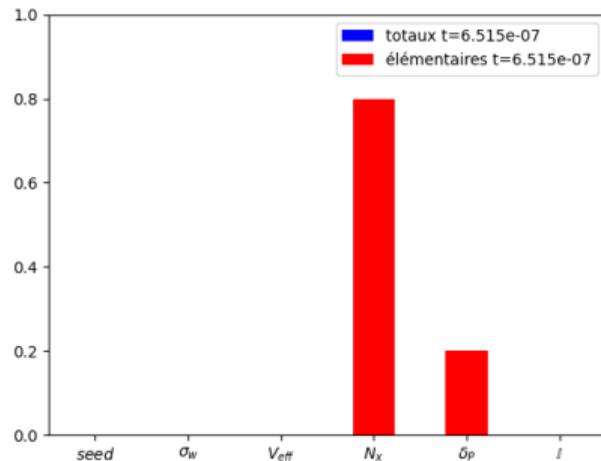
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

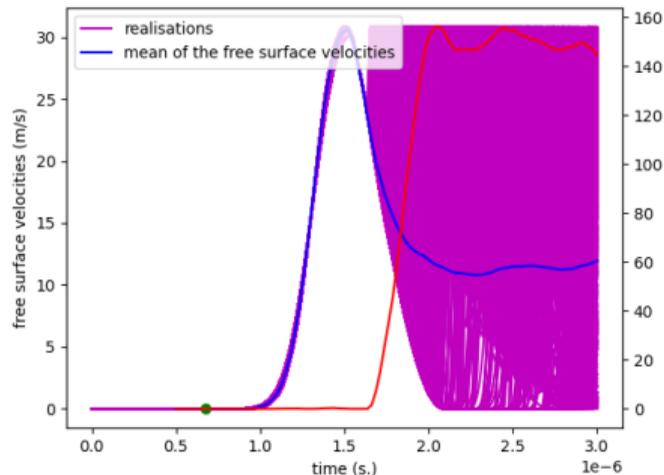
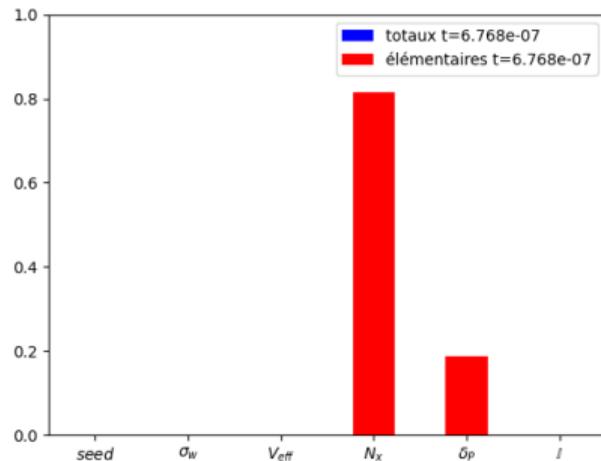
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

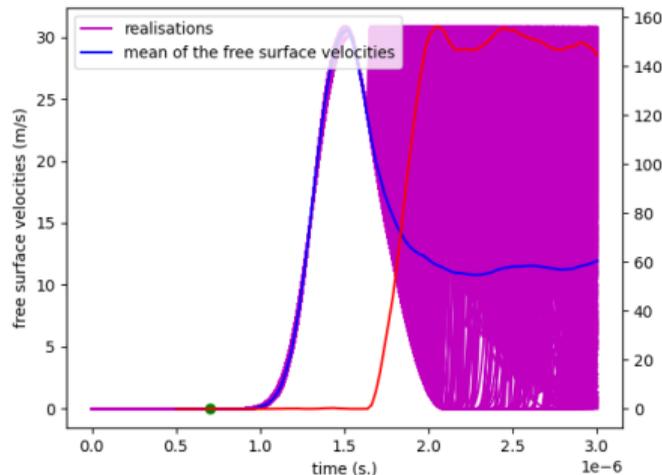
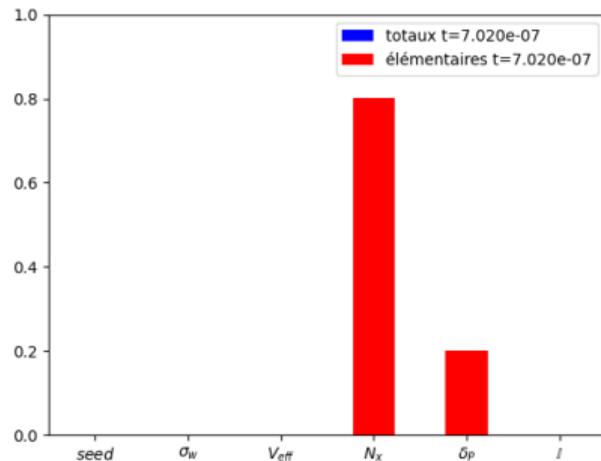
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

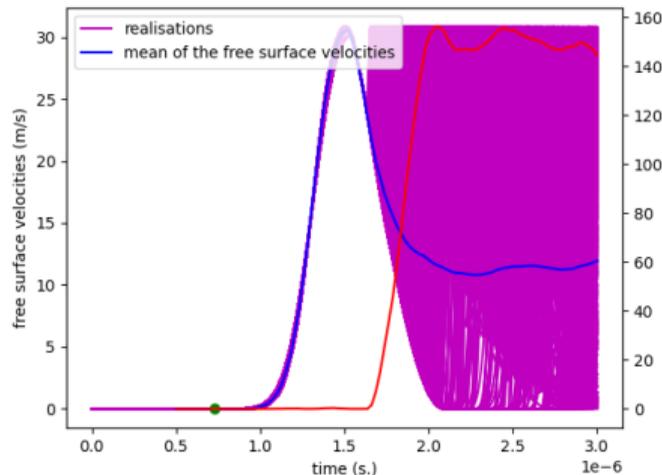
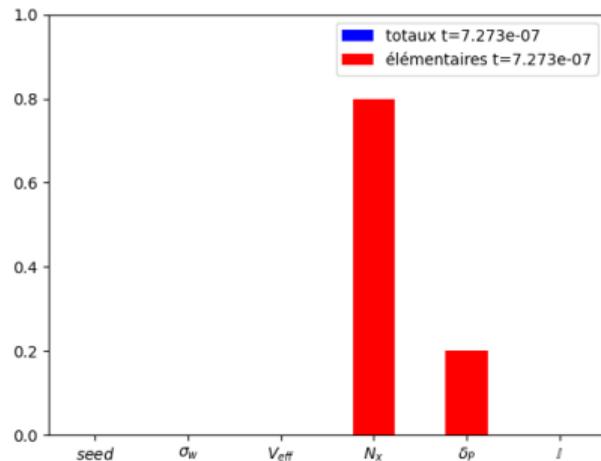
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

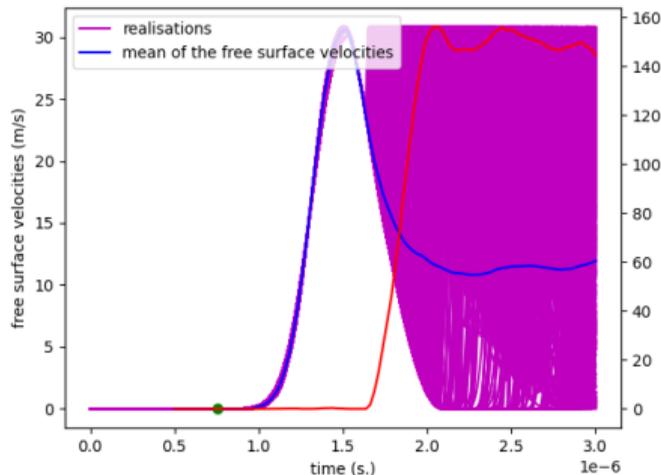
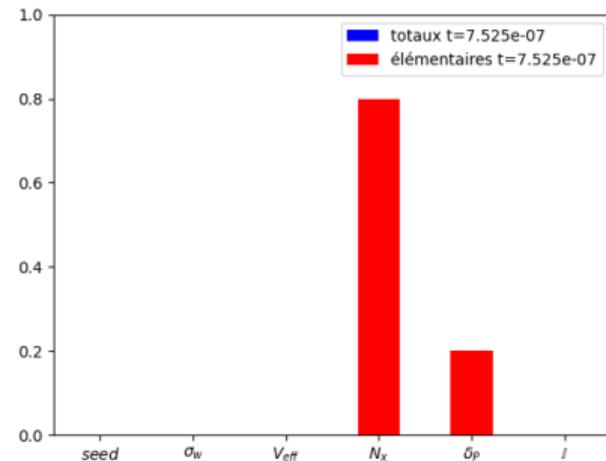
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

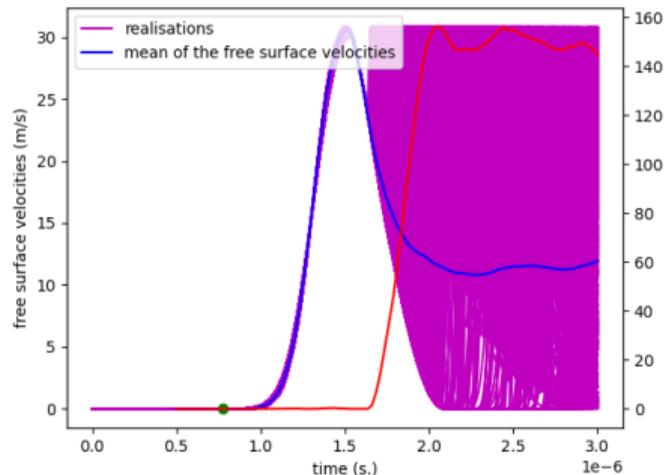
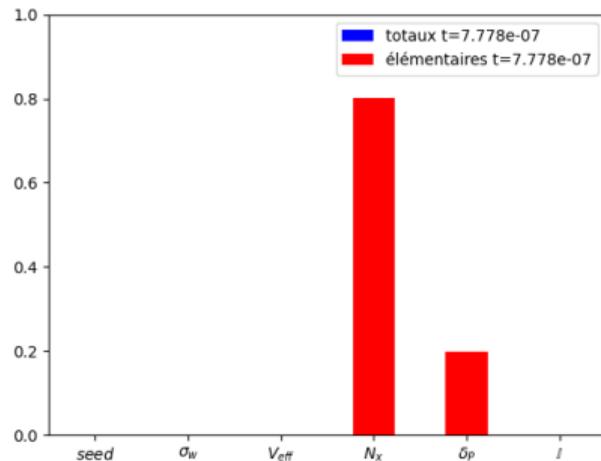
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

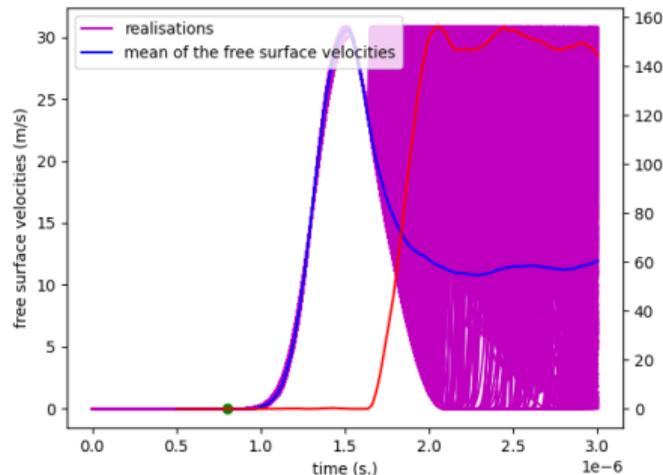
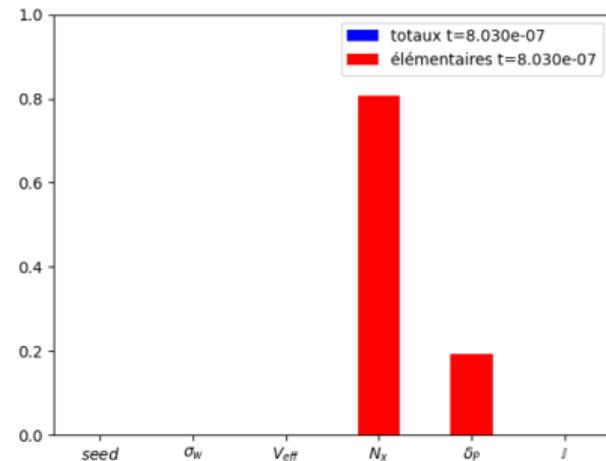
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

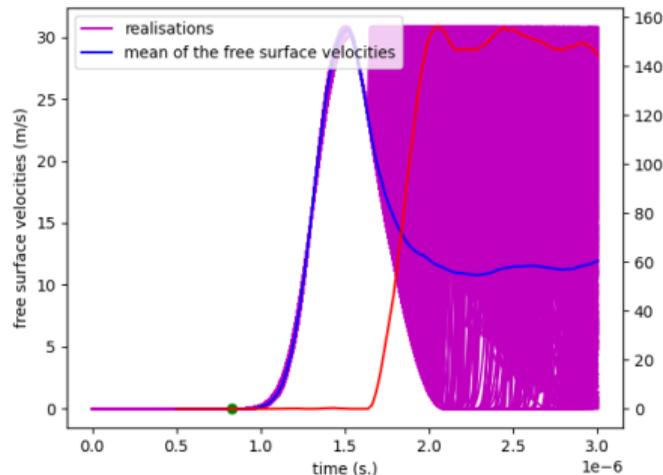
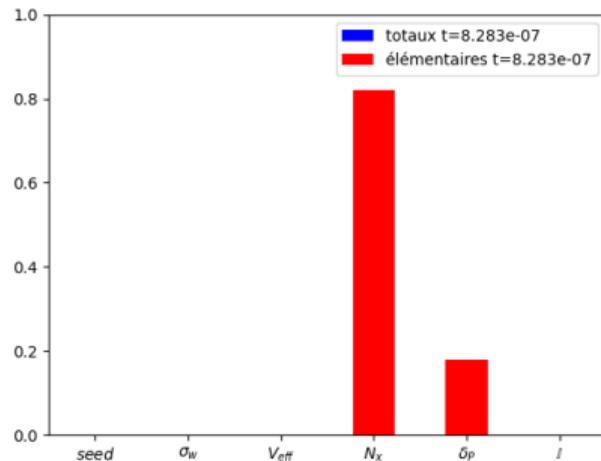
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

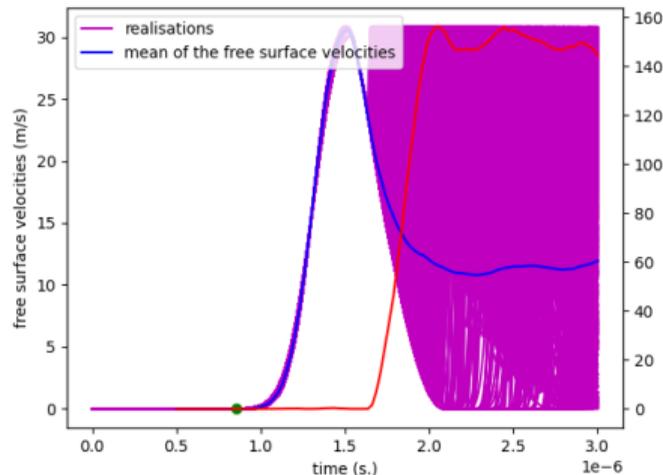
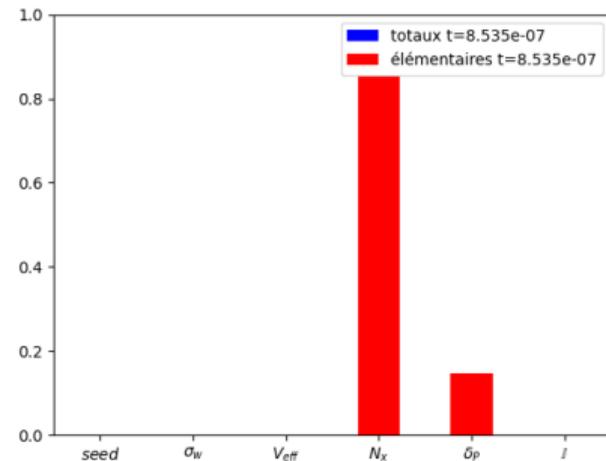
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

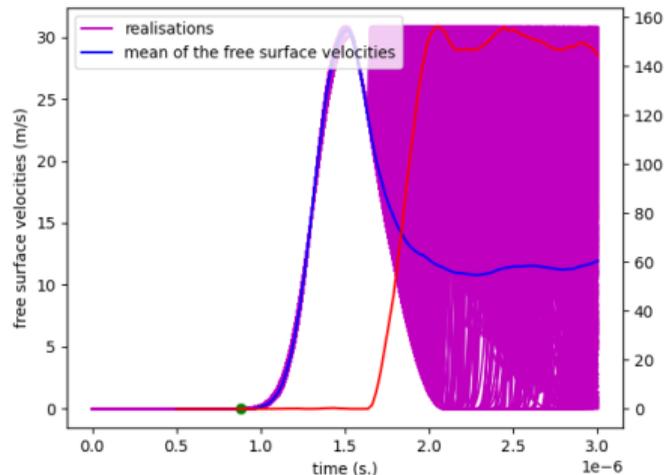
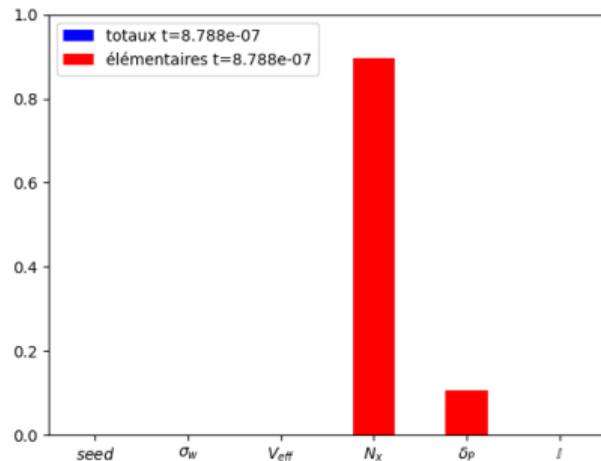
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

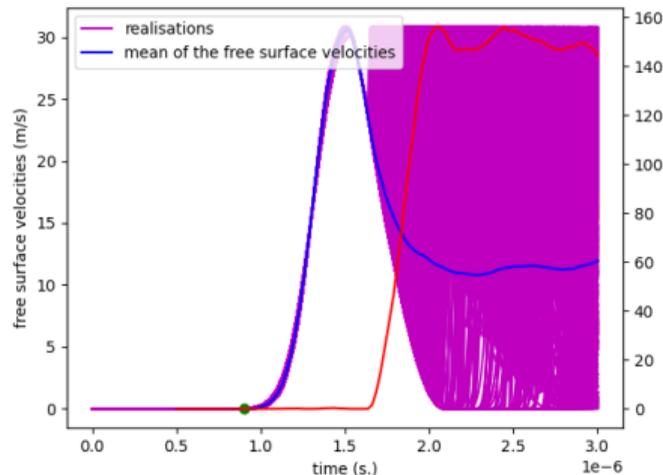
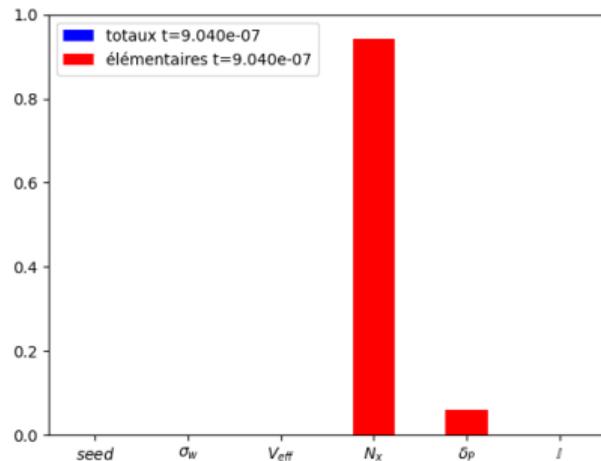
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

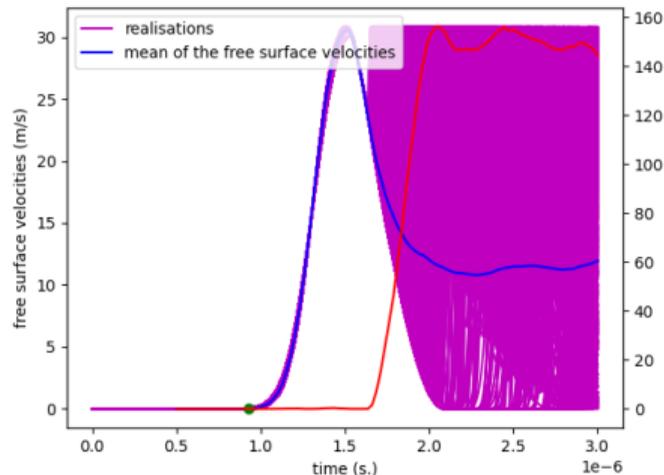
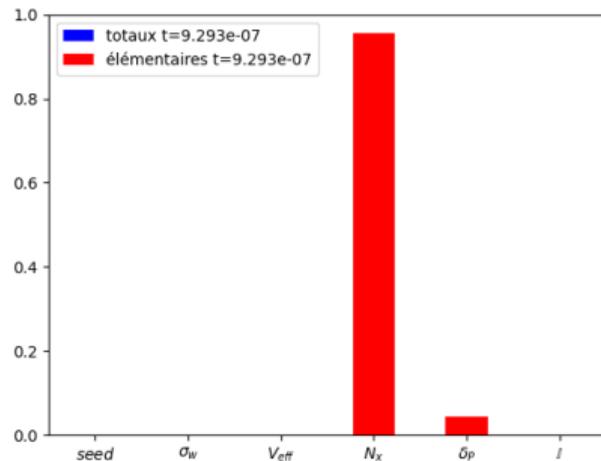
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

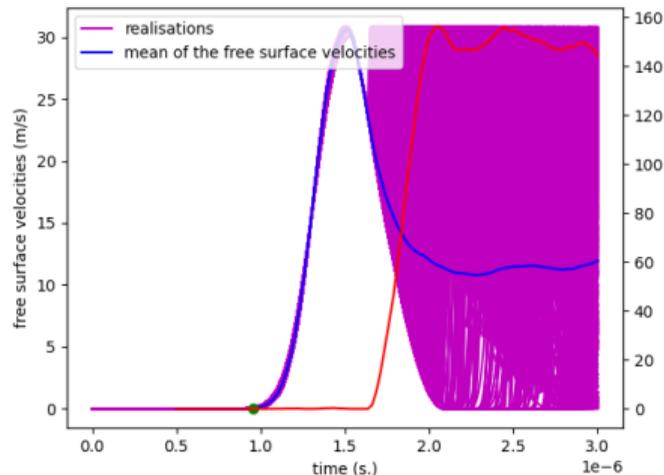
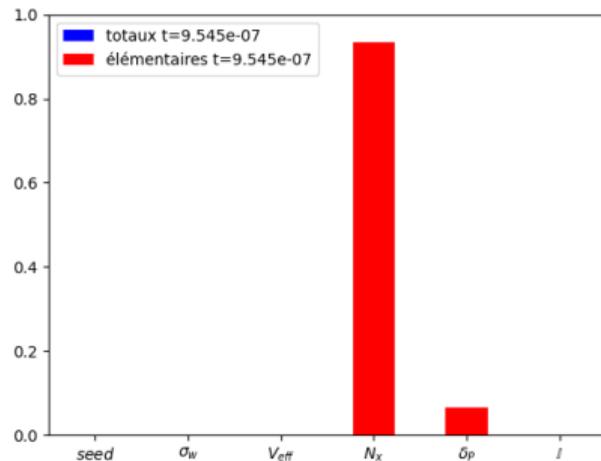
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

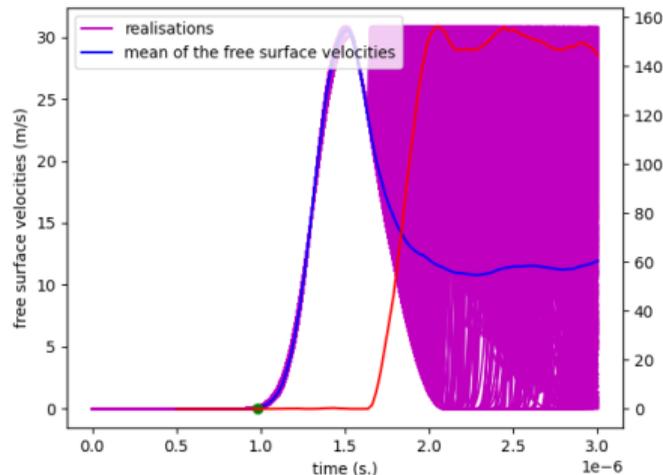
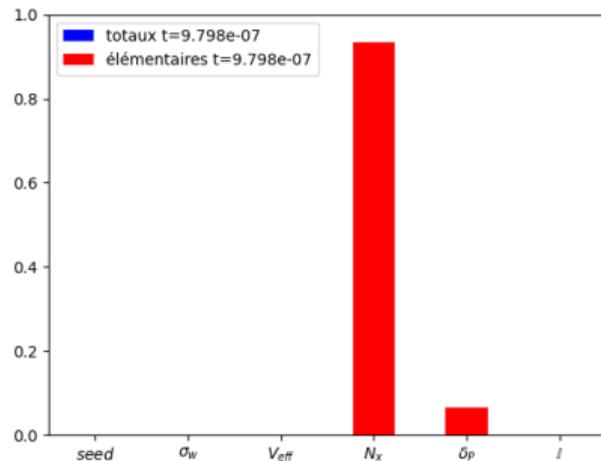
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

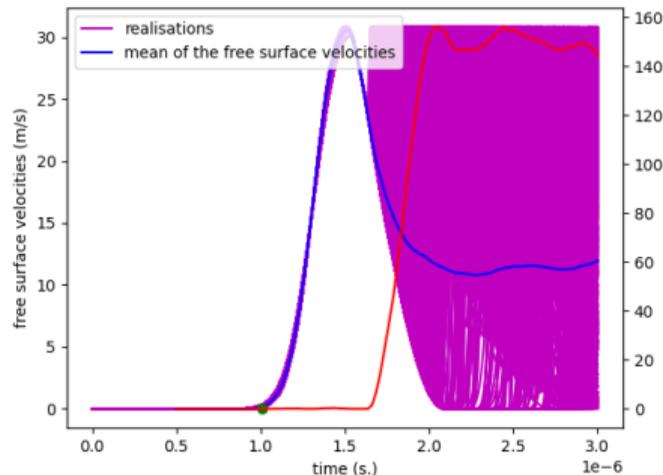
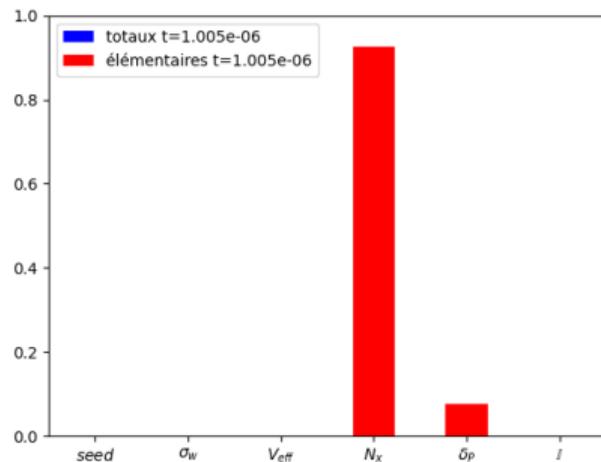
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

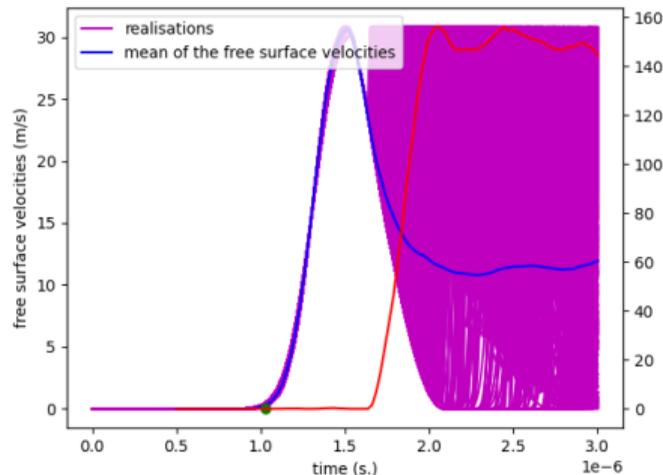
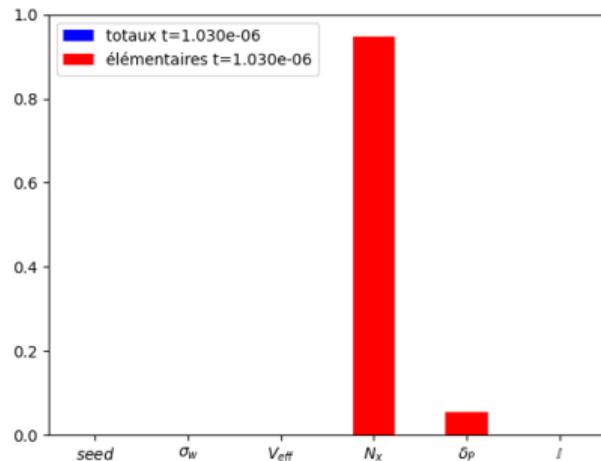
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

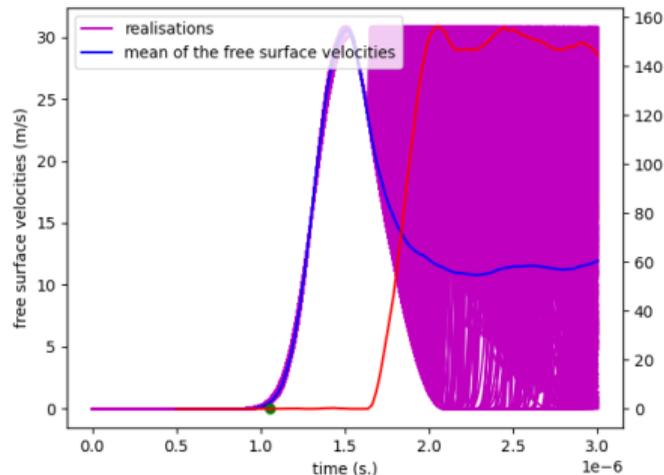
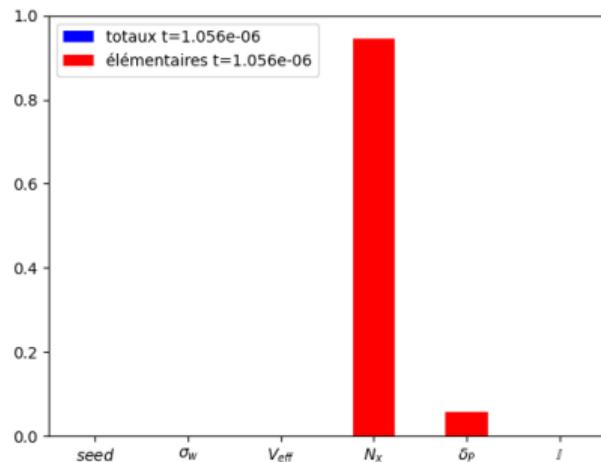
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

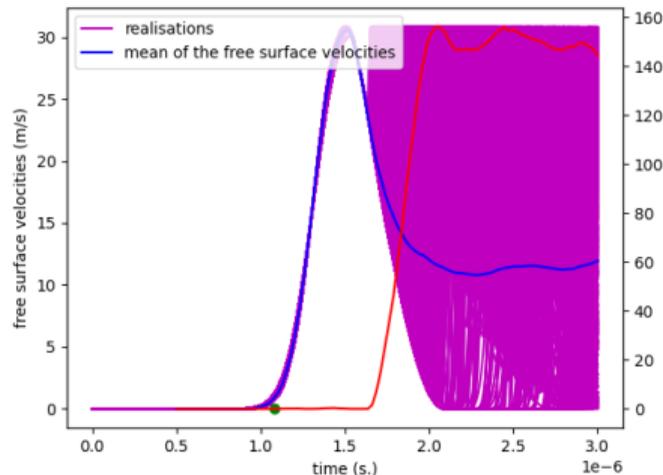
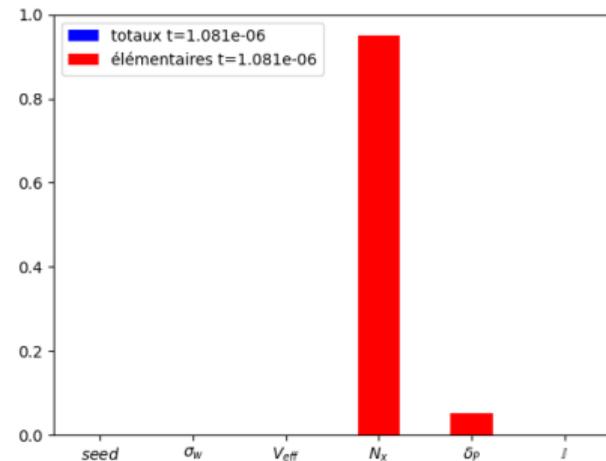
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

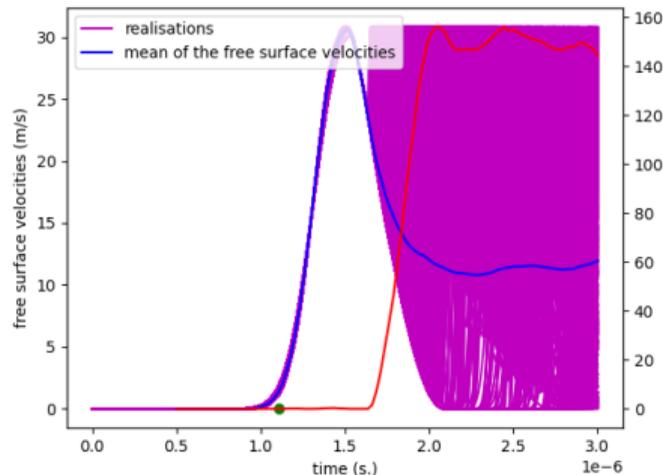
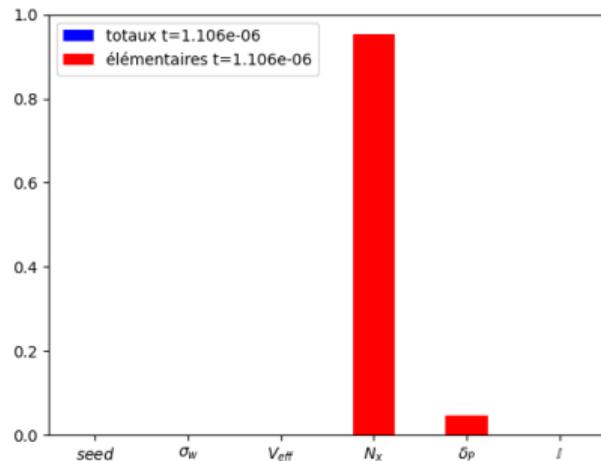
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

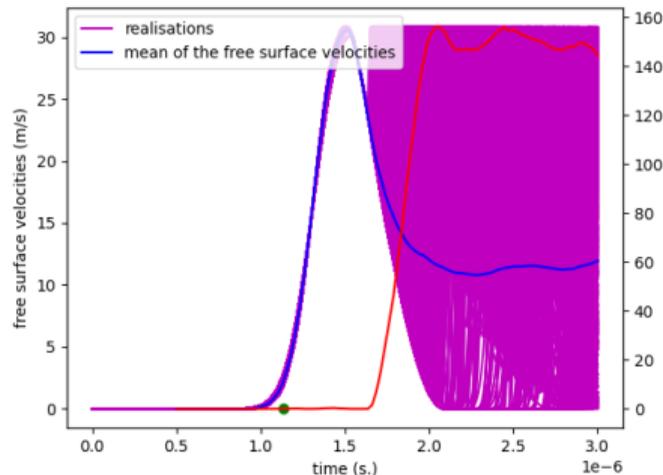
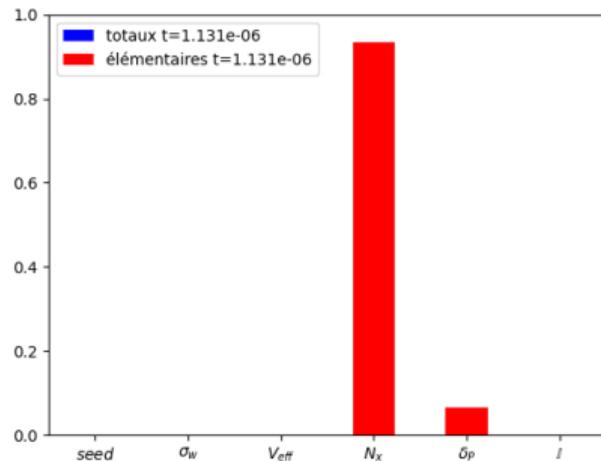
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

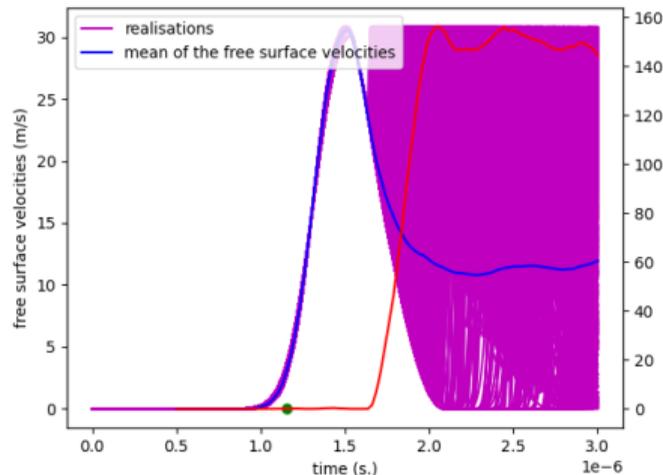
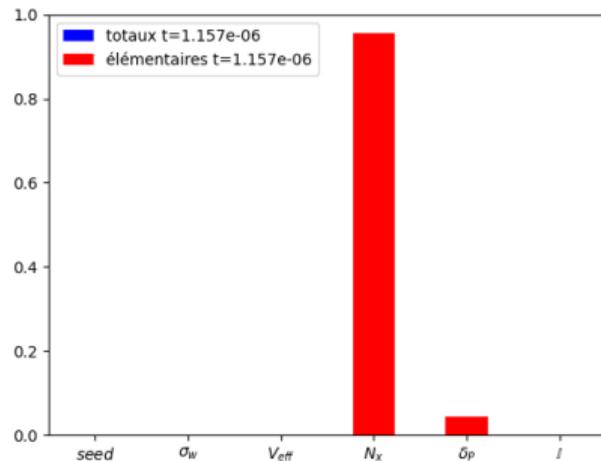
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

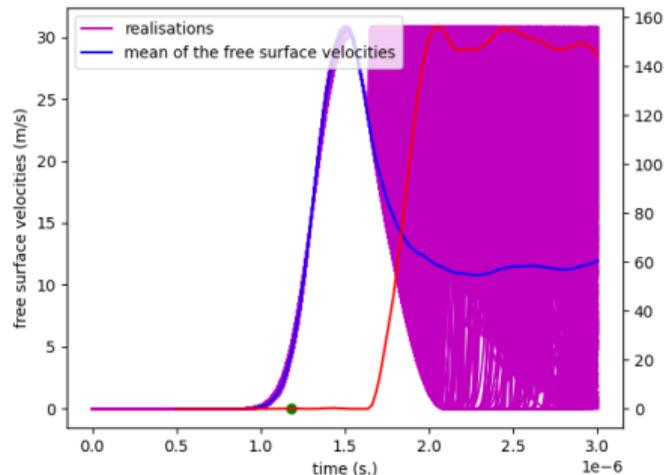
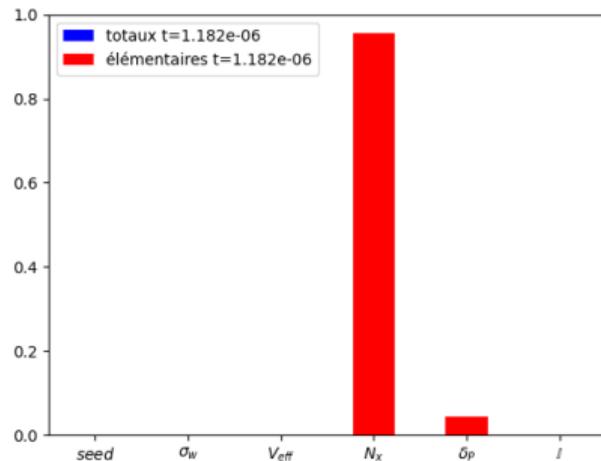
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

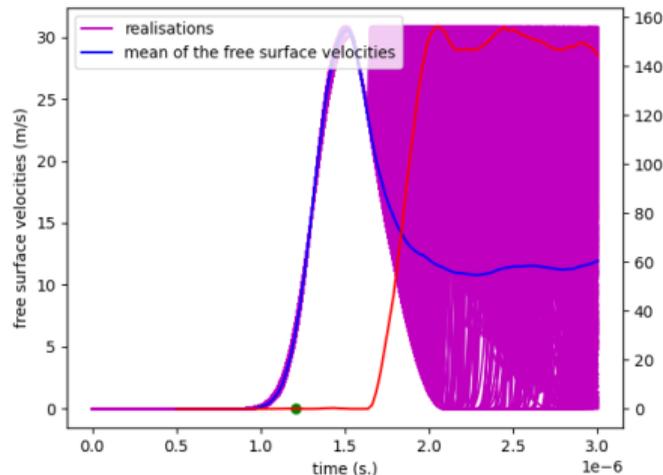
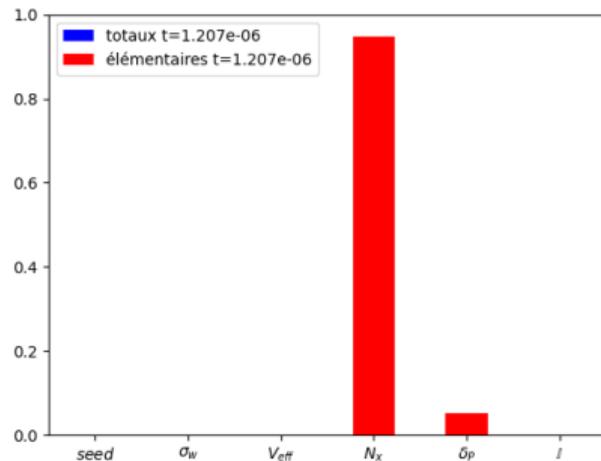
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

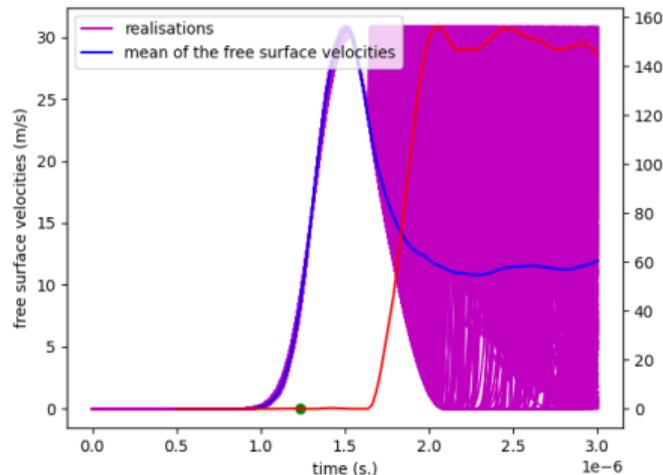
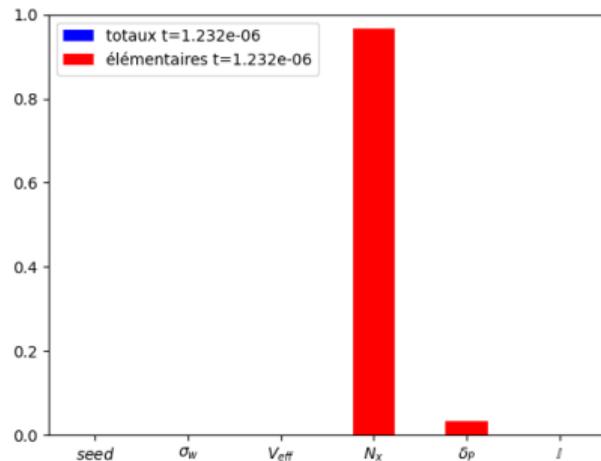
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

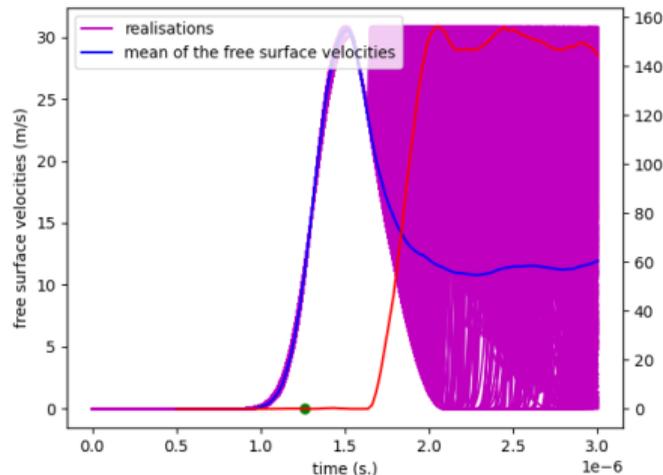
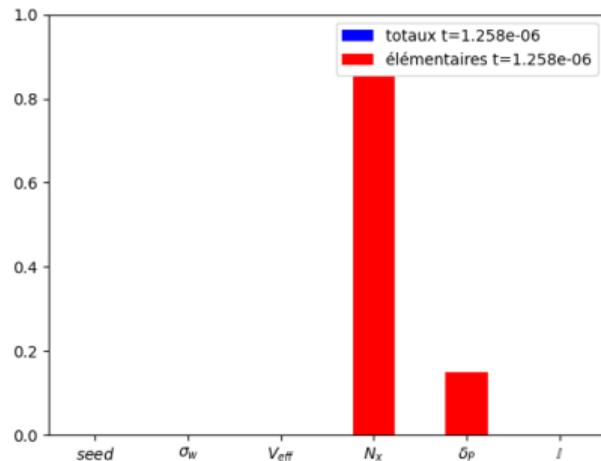
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

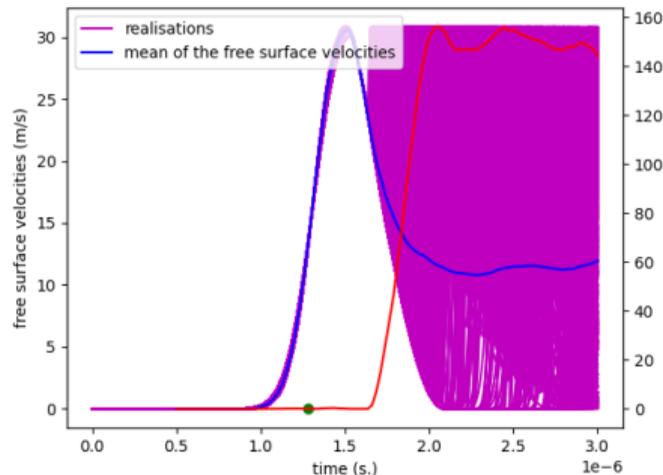
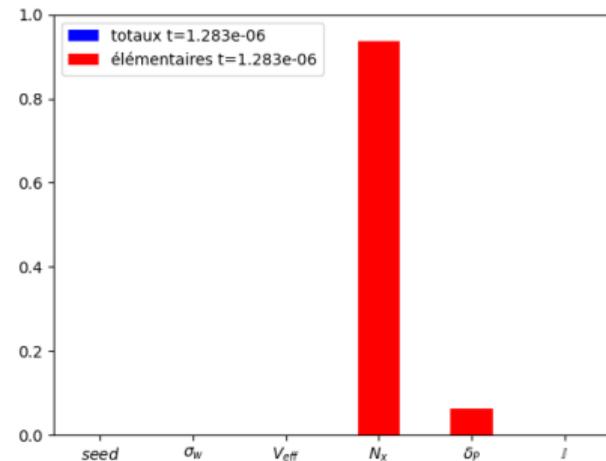
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

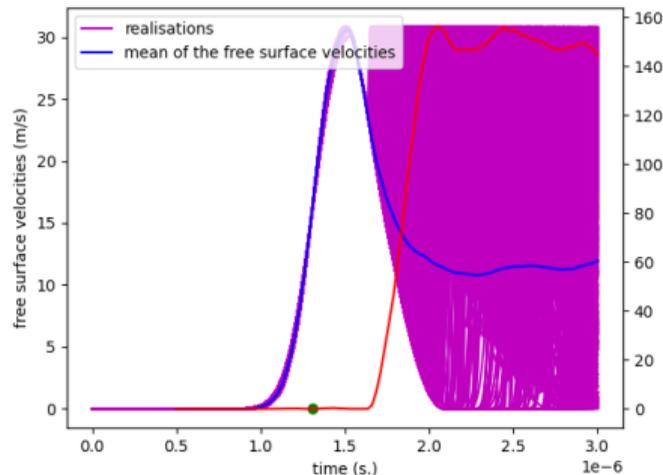
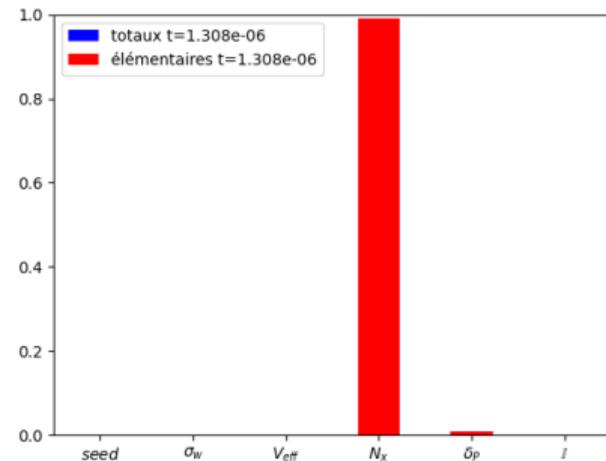
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

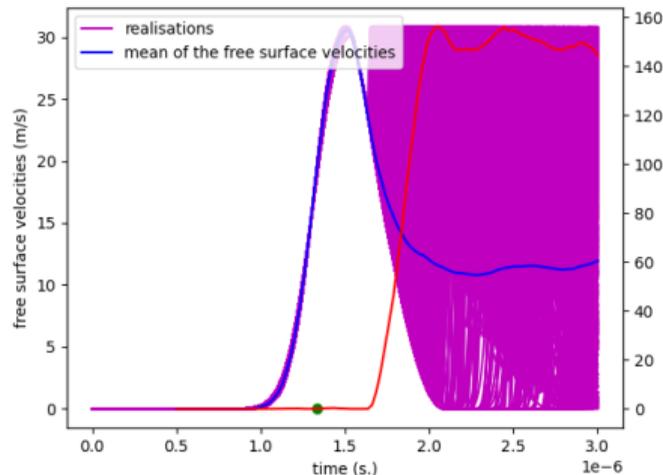
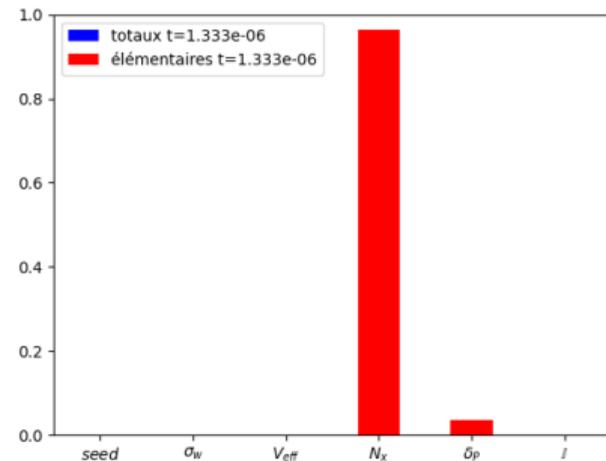
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

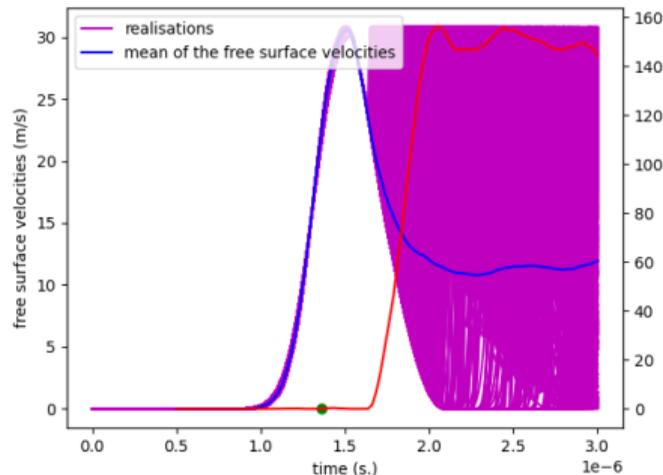
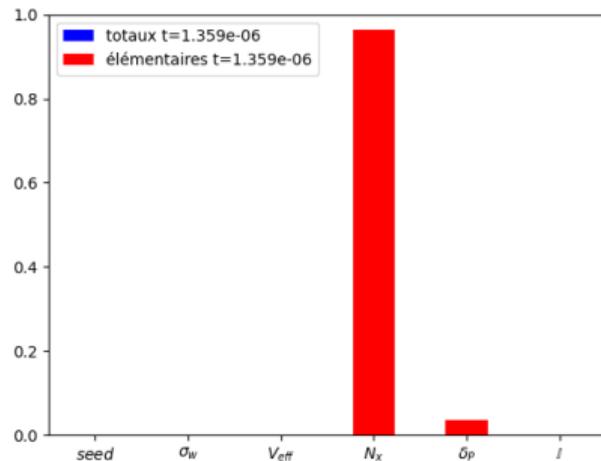
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

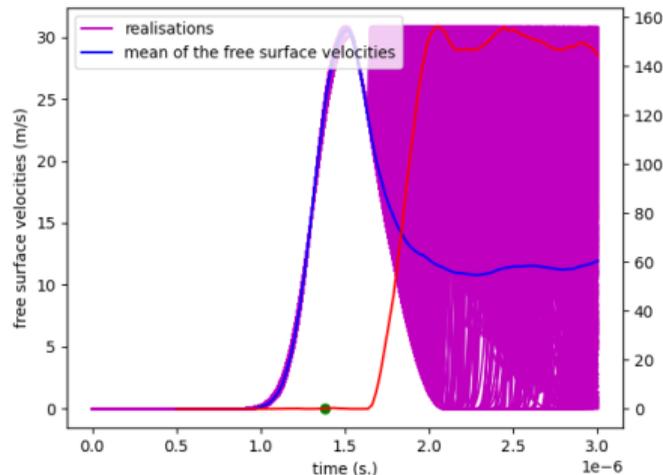
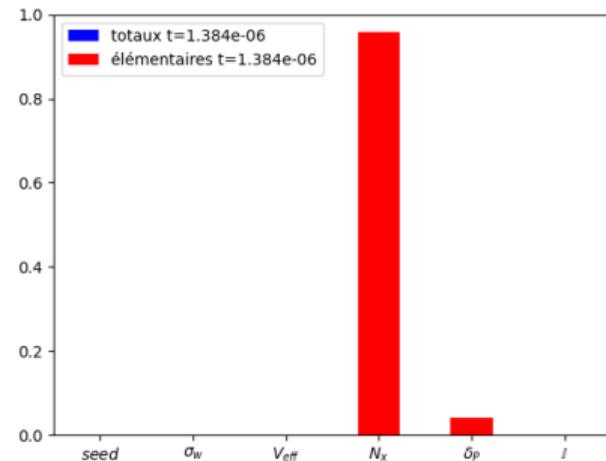
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

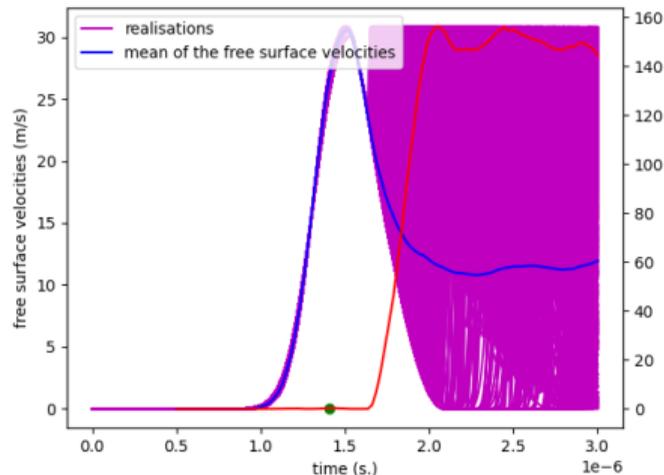
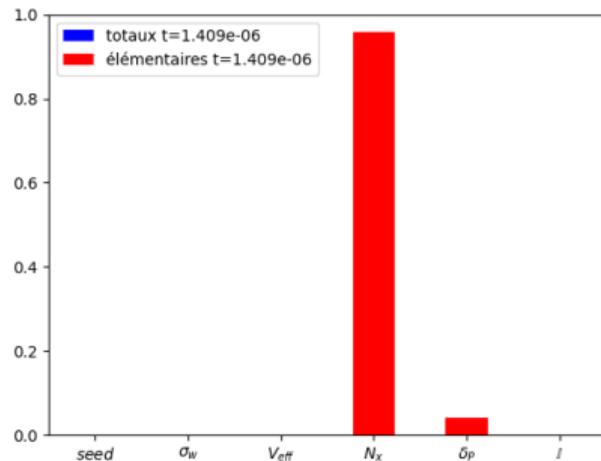
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

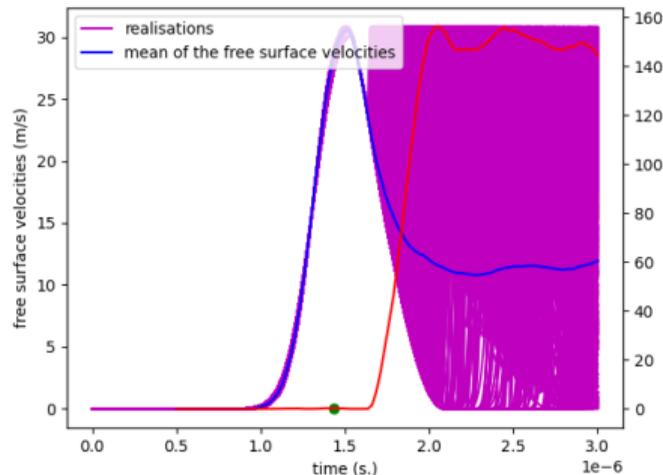
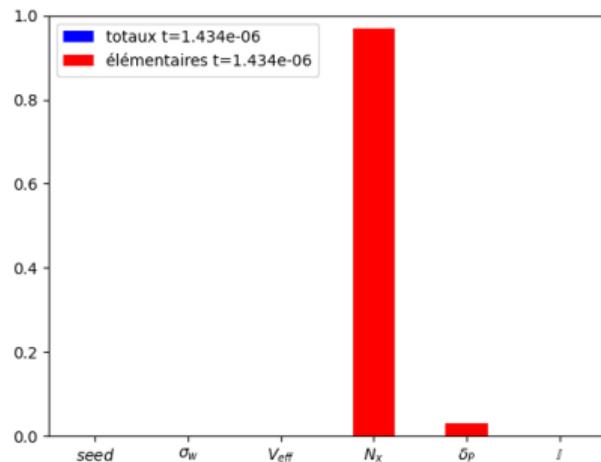
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

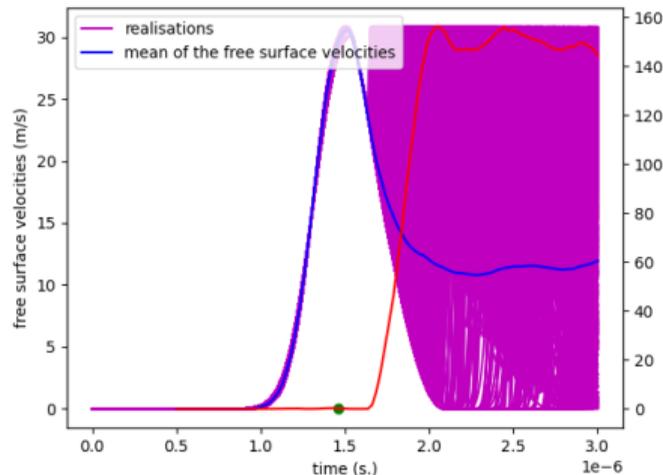
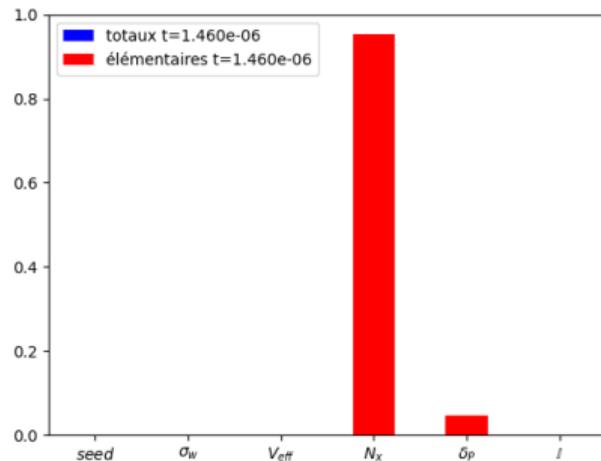
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

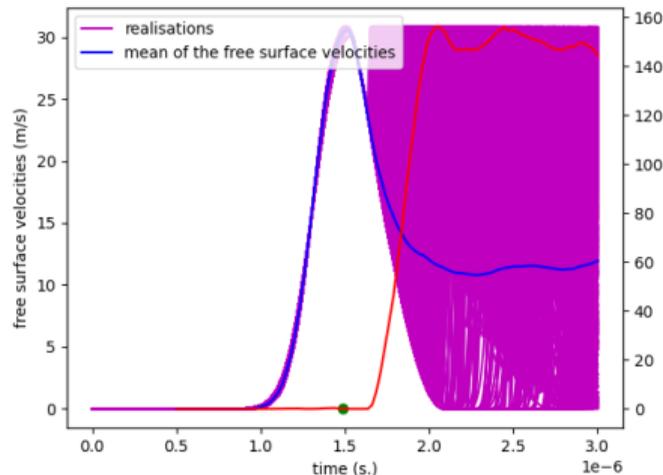
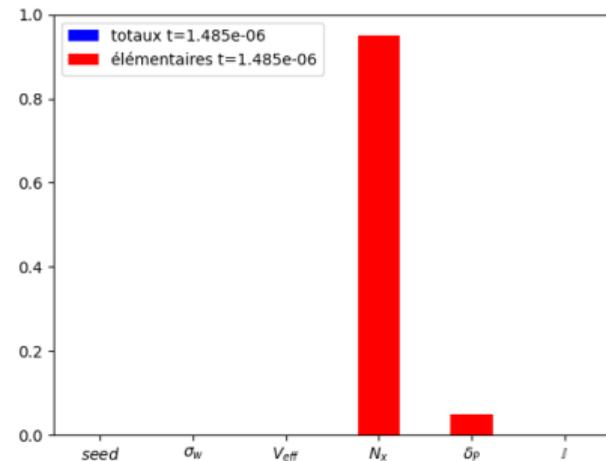
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

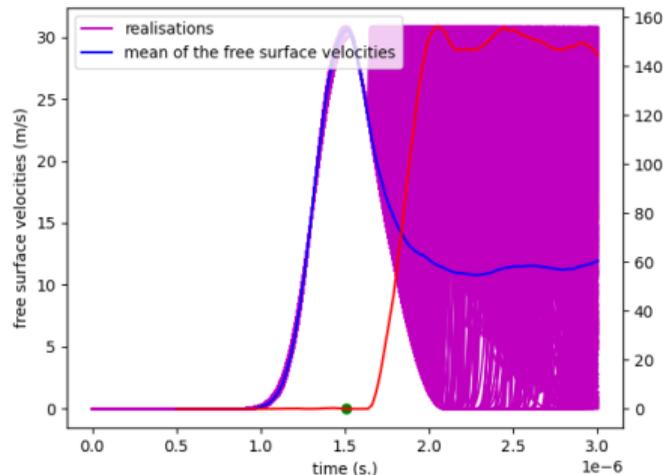
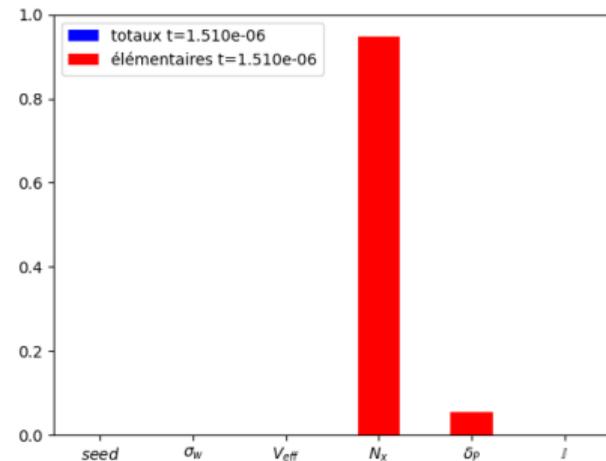
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

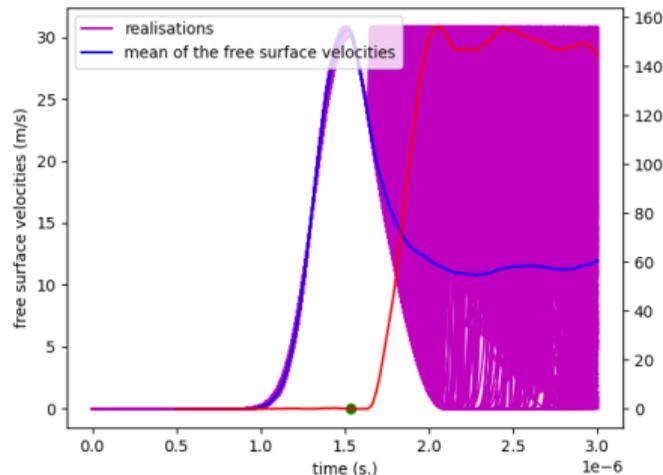
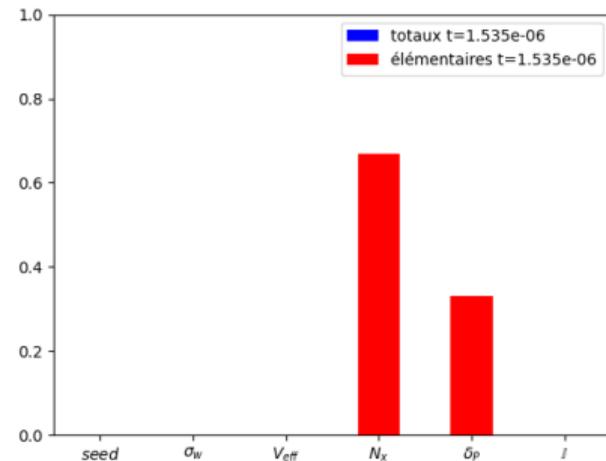
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

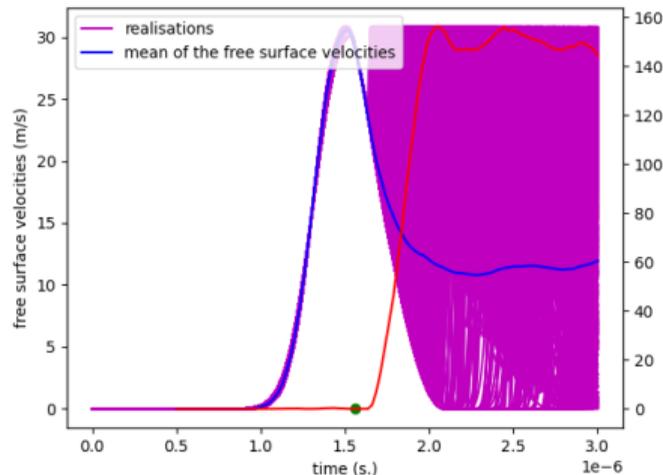
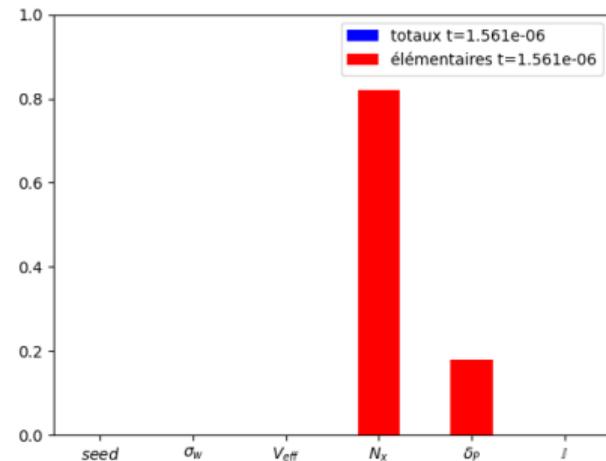
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

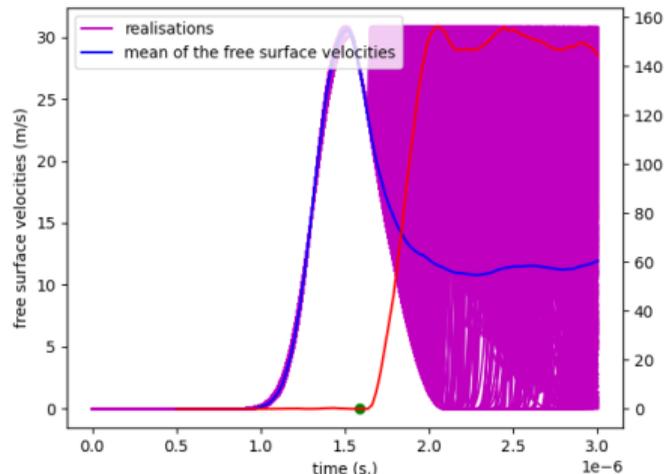
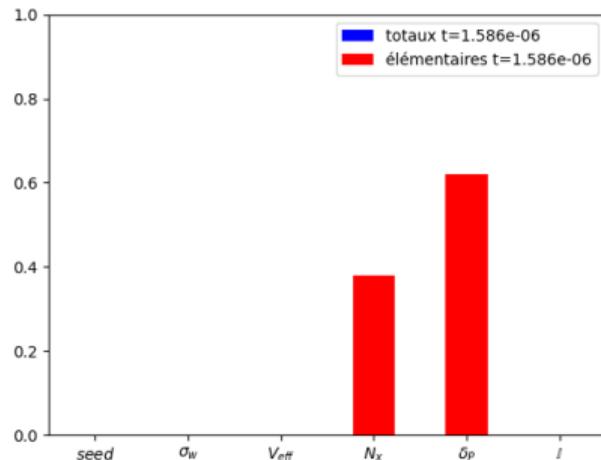
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

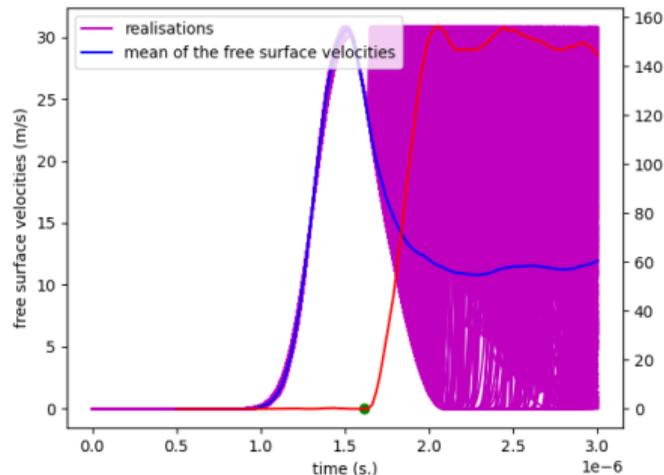
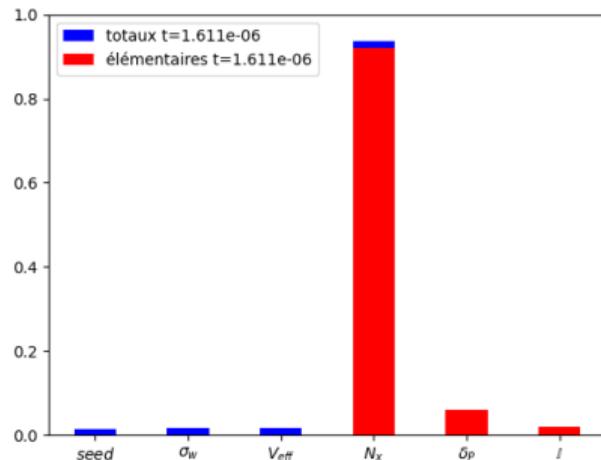
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_p$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

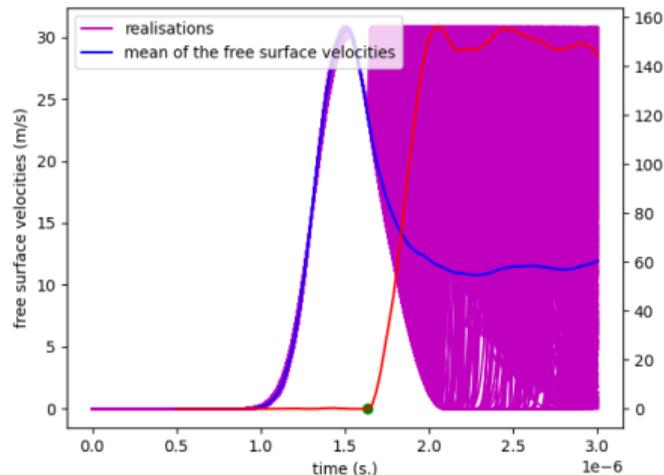
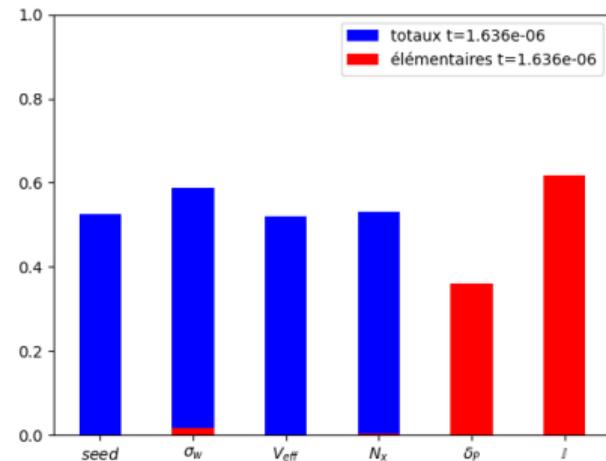
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. inactif:  $N_x$  prépondérant (avec une bonne fiabilité: indice de  $\delta_\rho$  relativement faible)  
(comportement attendu)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

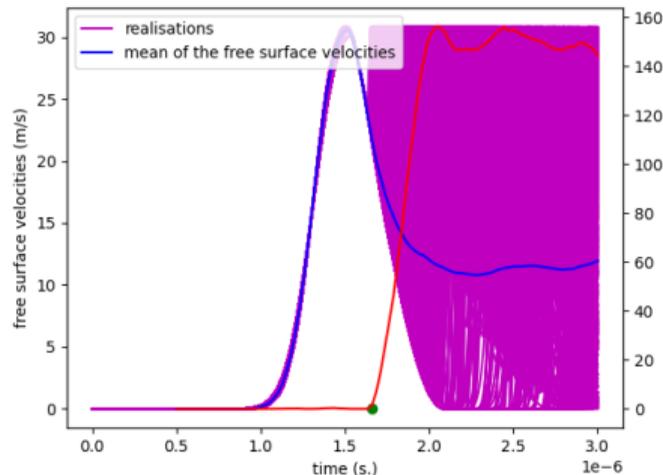
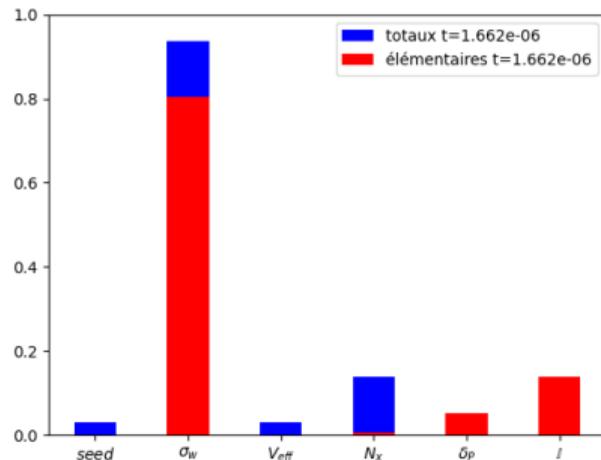
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



indice de  $\delta_\rho$  relativement trop grand pour avoir confiance en le modèle à ce temps  
(pas d'interprétation des résultats à ce temps)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

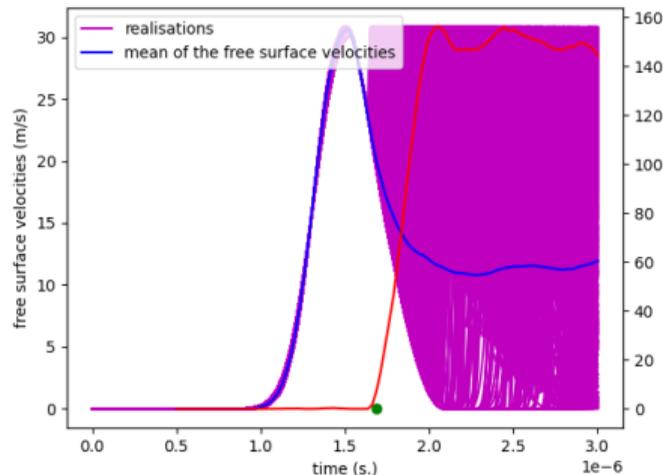
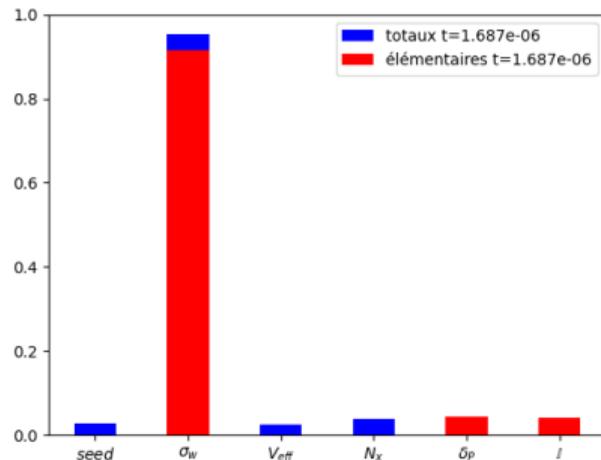
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

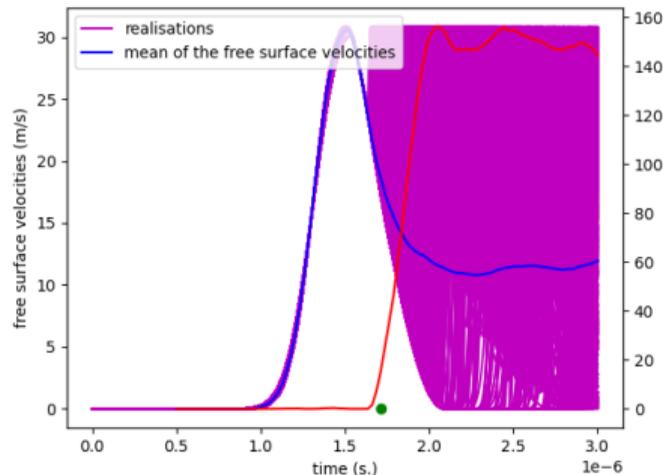
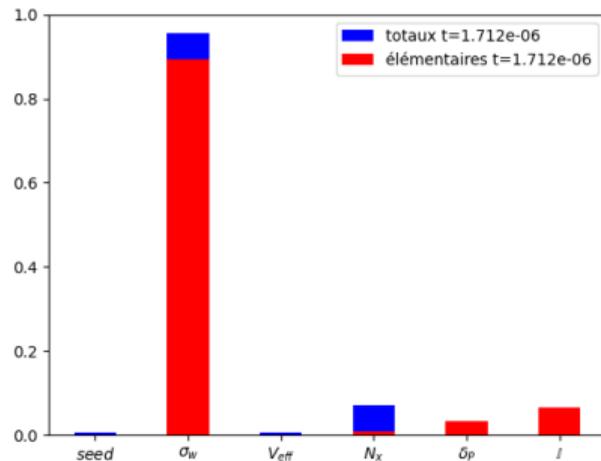
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

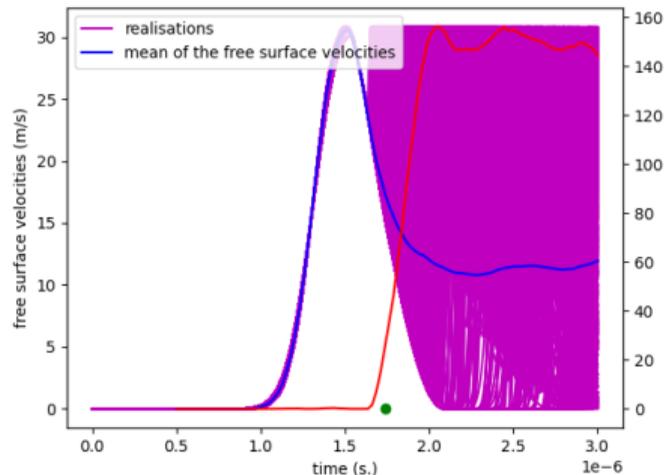
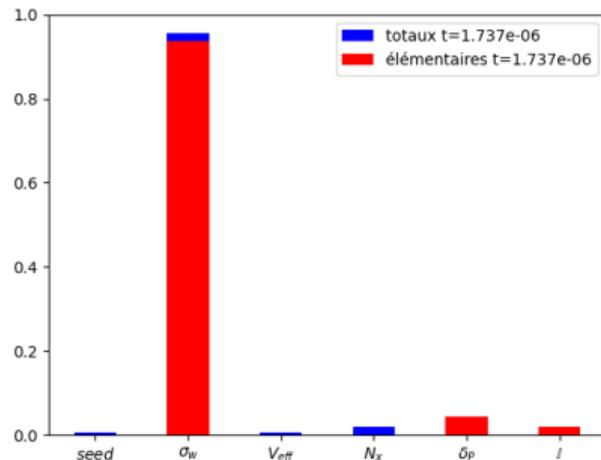
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

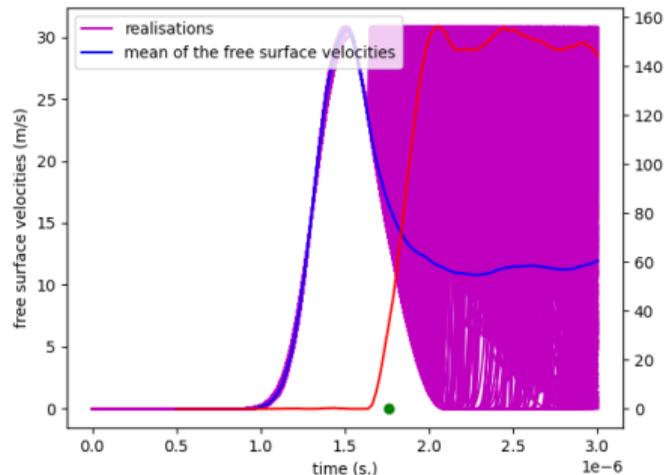
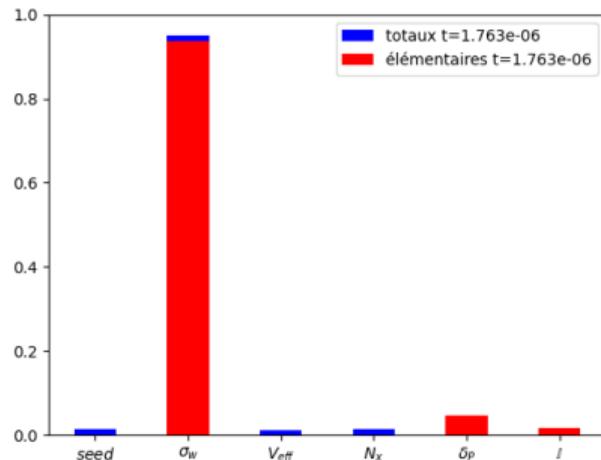
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

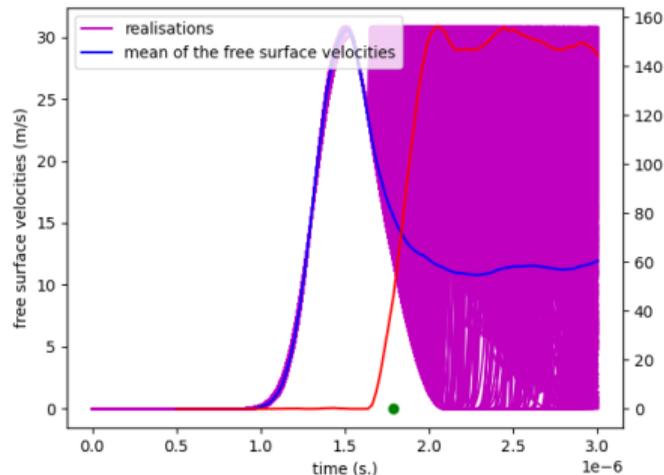
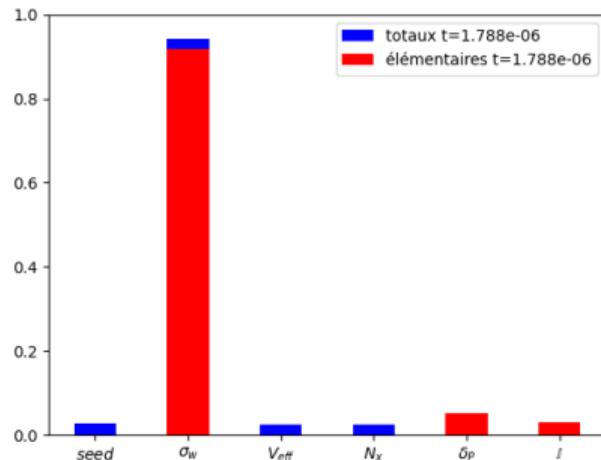
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

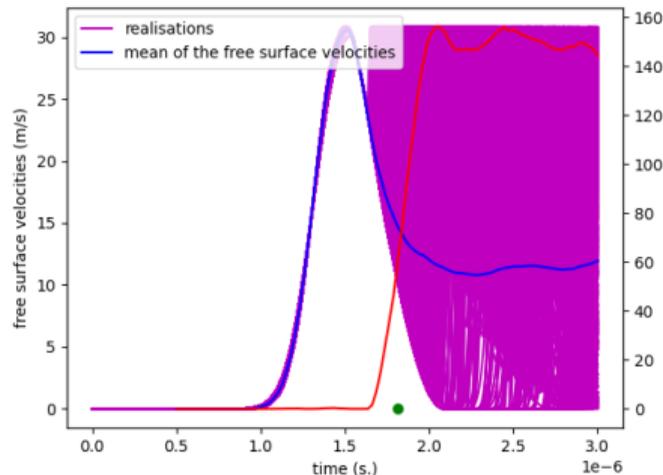
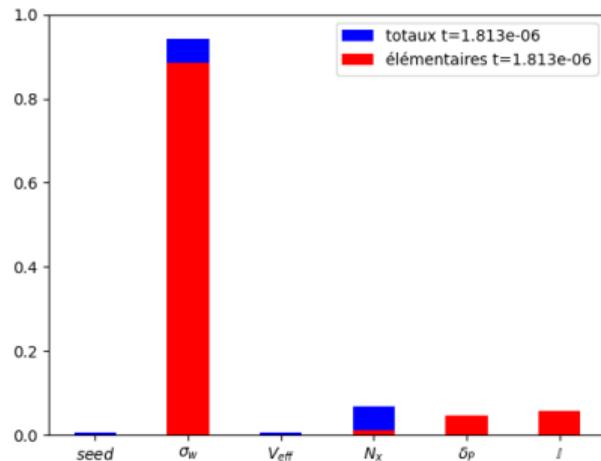
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

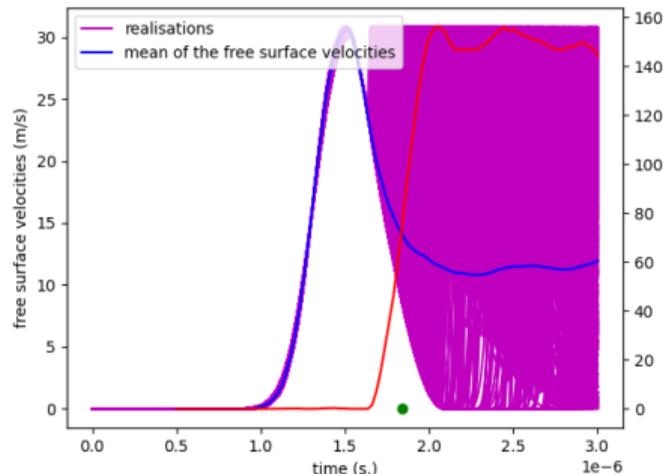
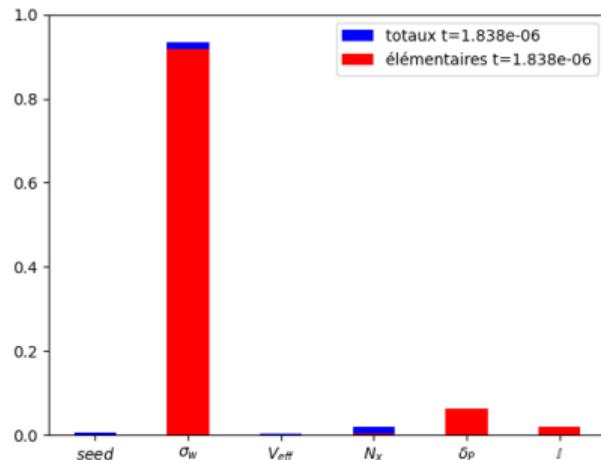
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

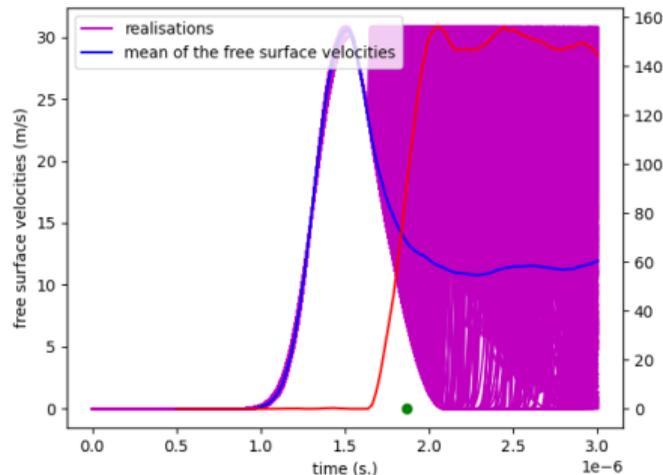
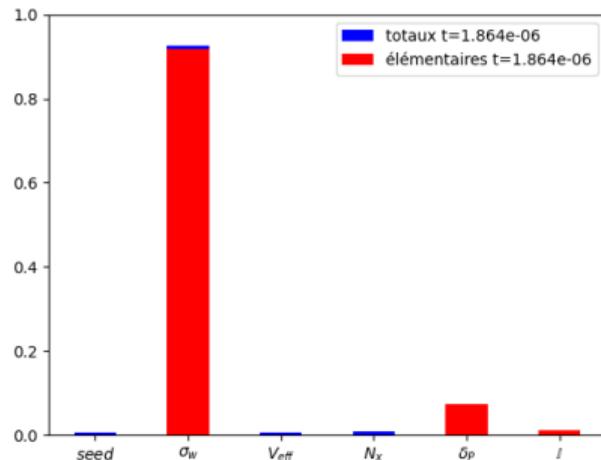
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

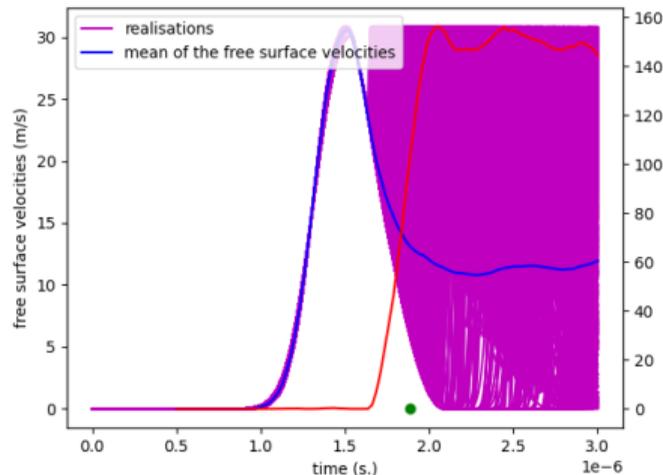
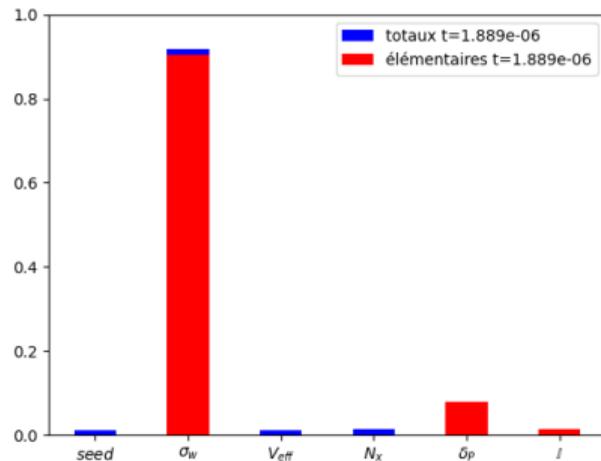
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

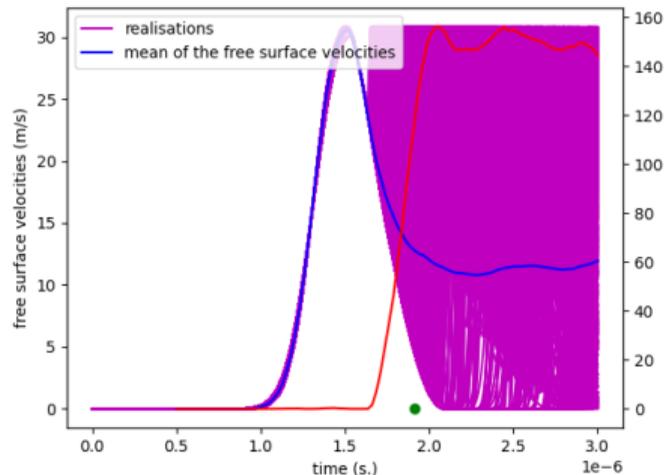
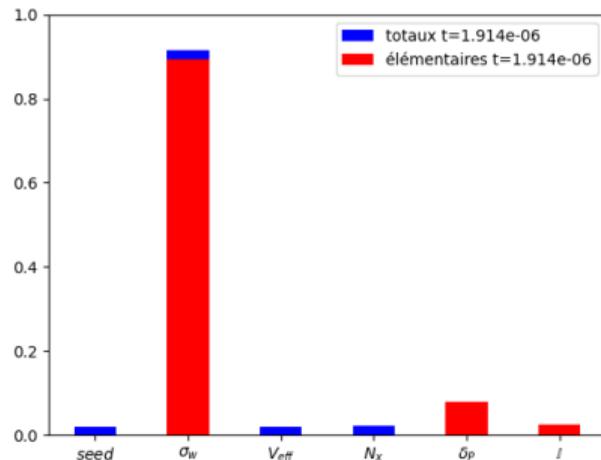
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

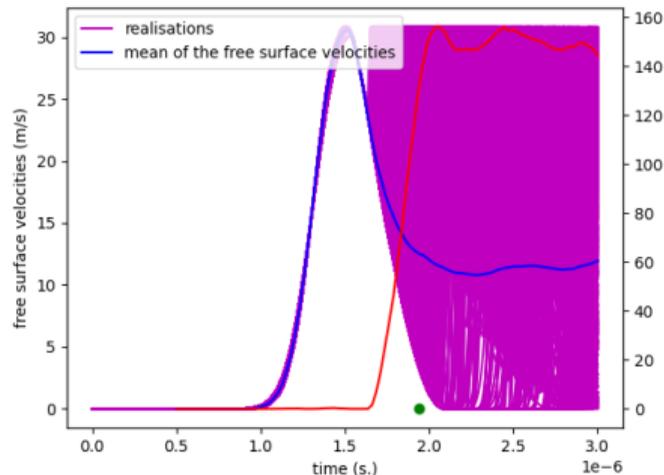
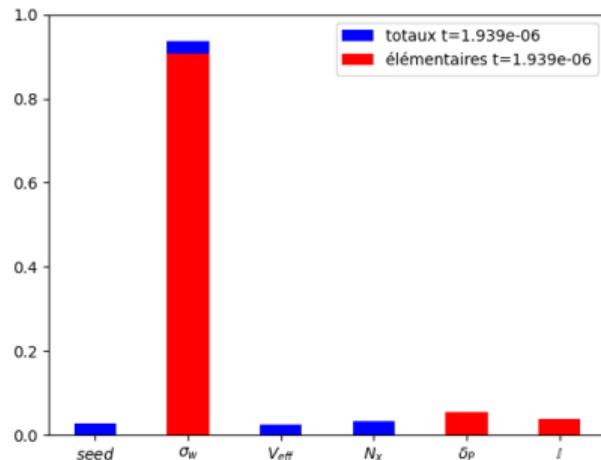
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

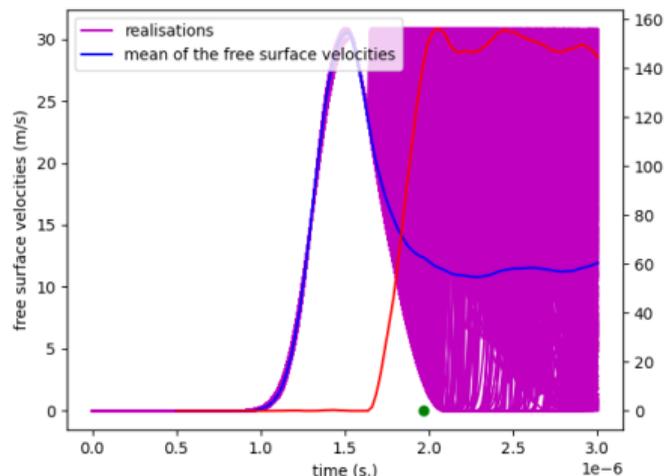
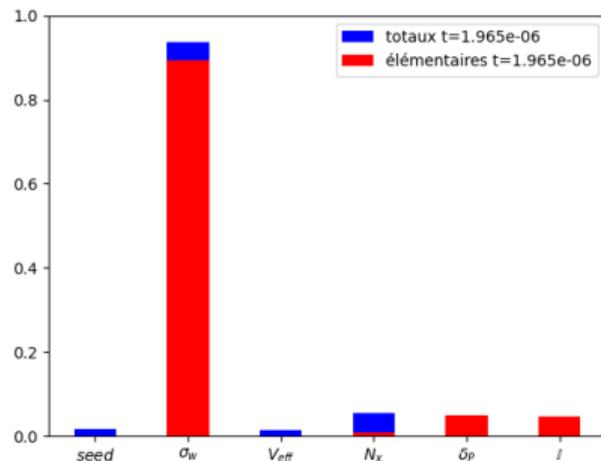
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

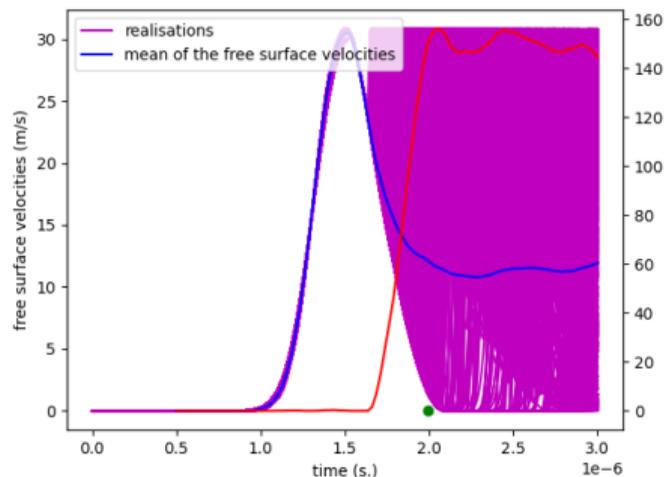
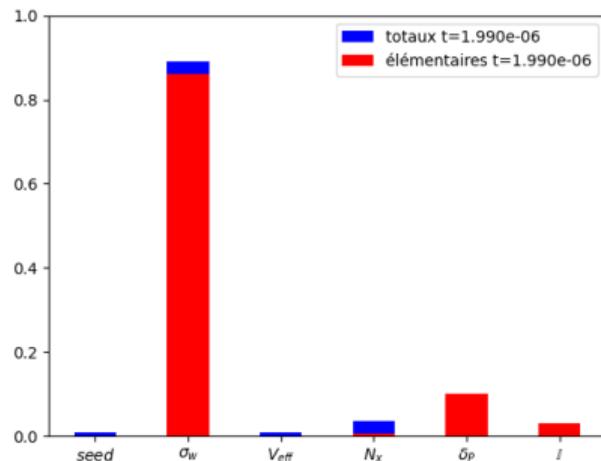
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

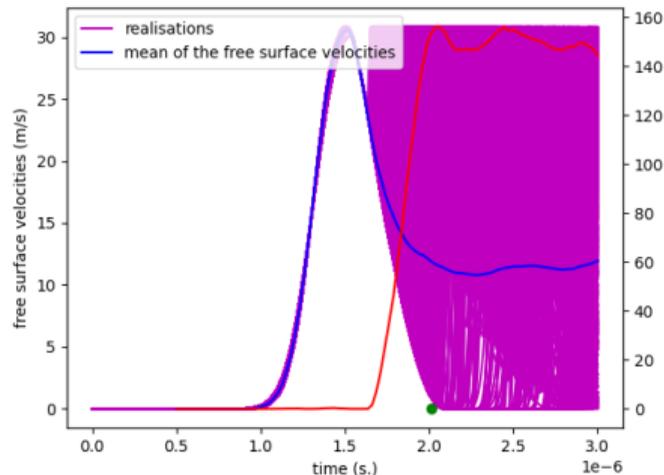
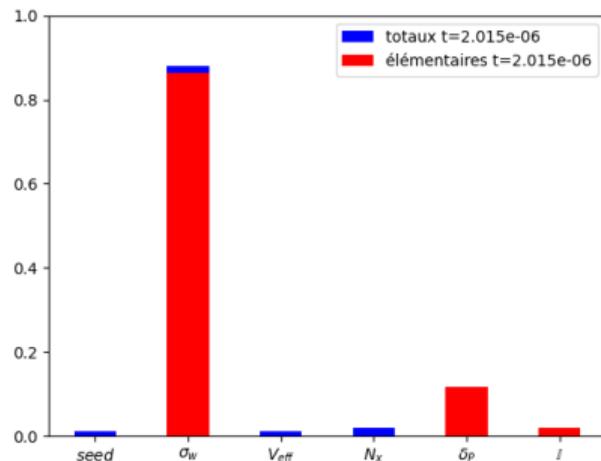
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

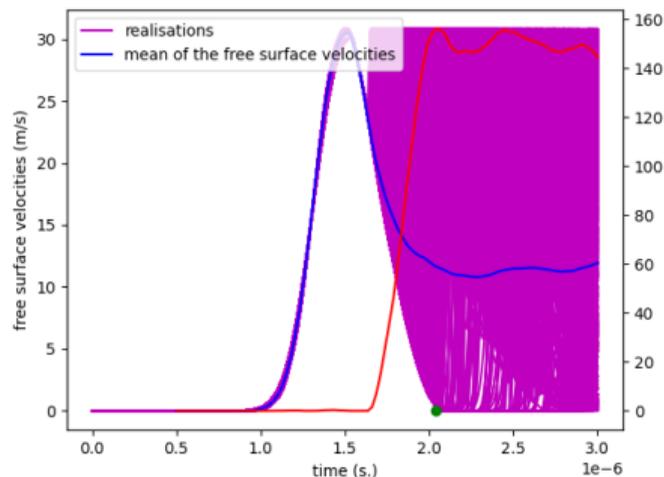
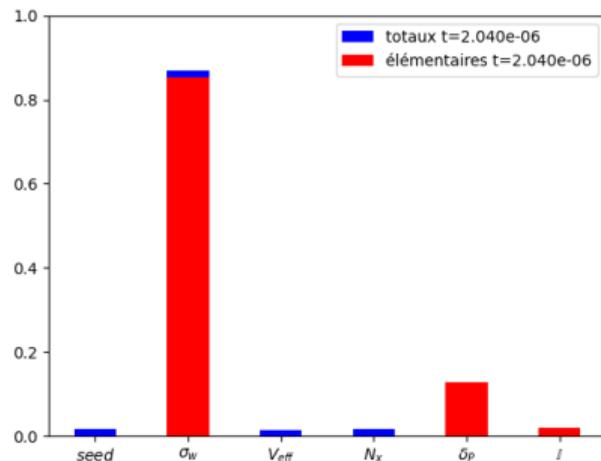
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

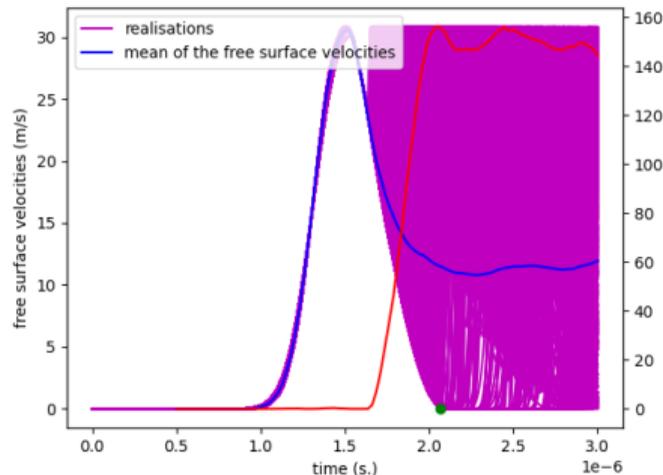
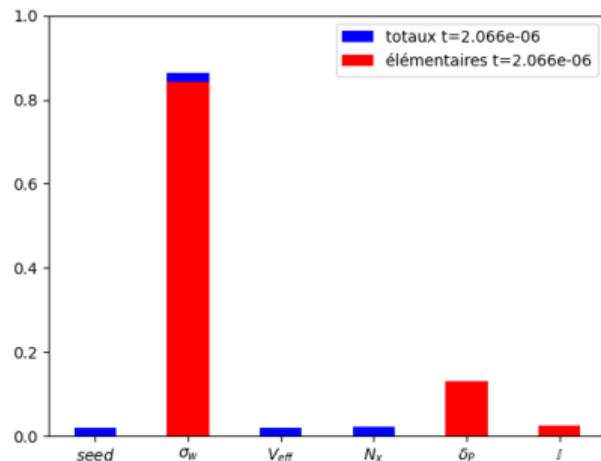
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

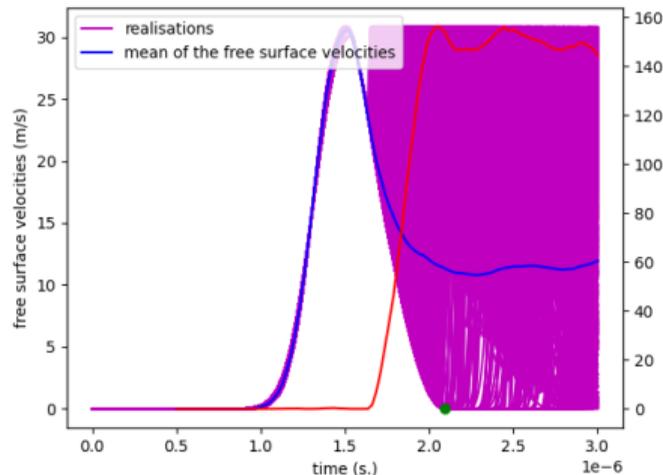
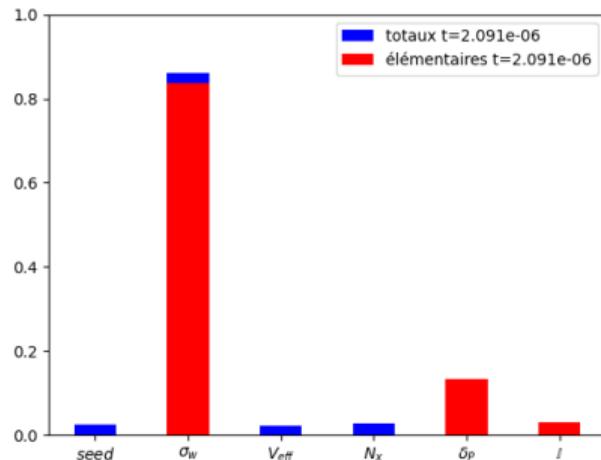
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

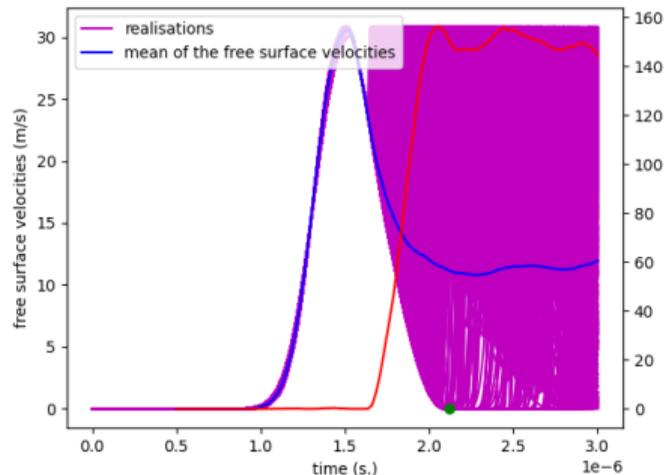
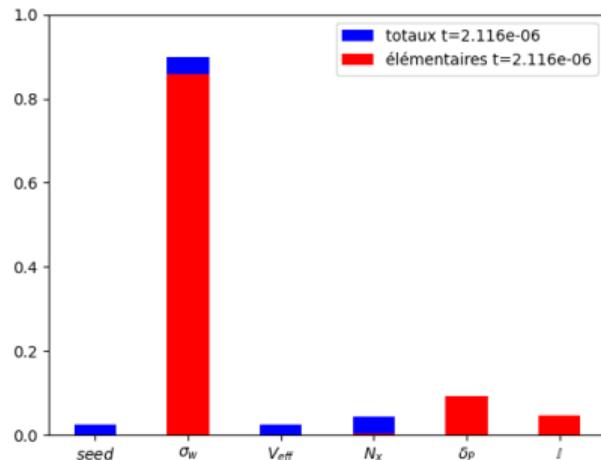
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

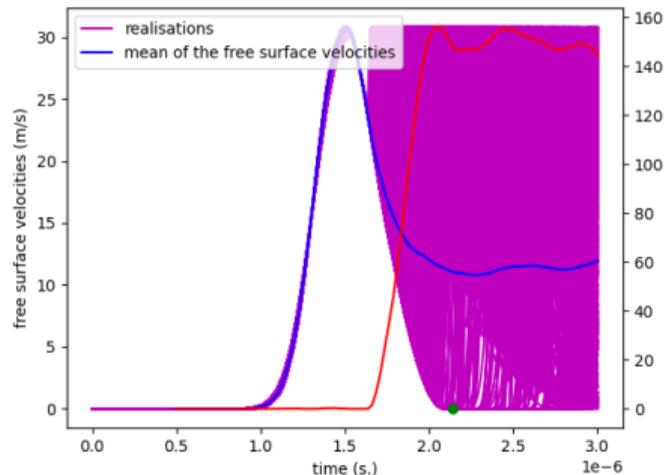
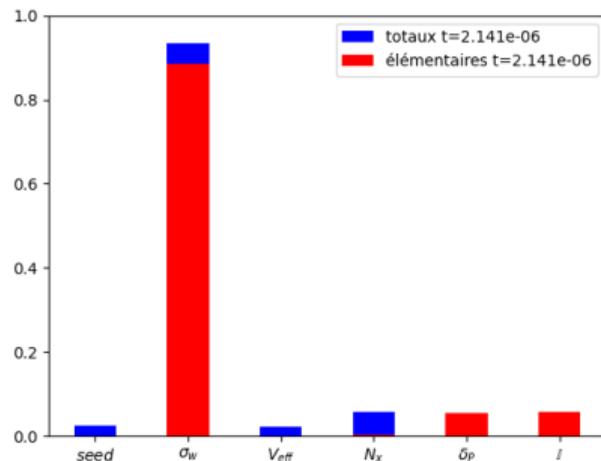
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

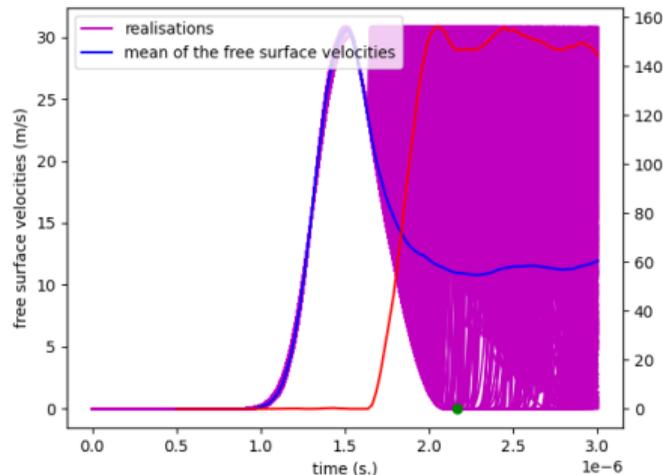
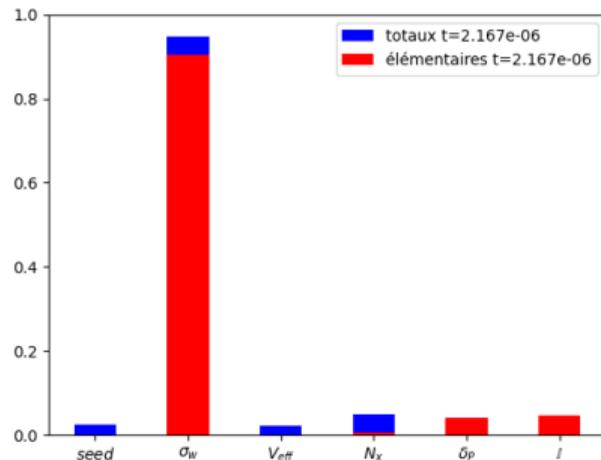
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

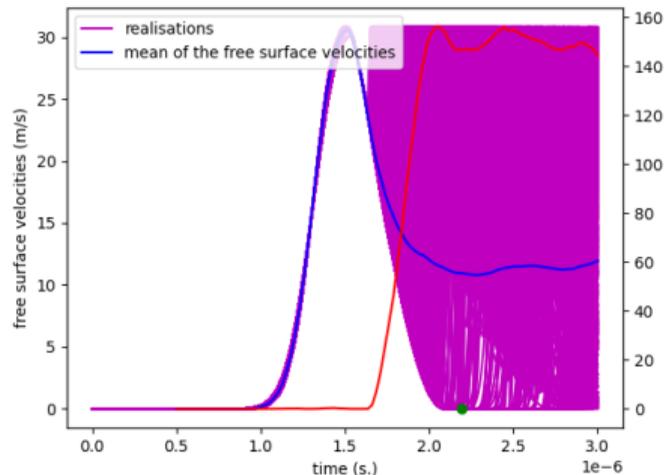
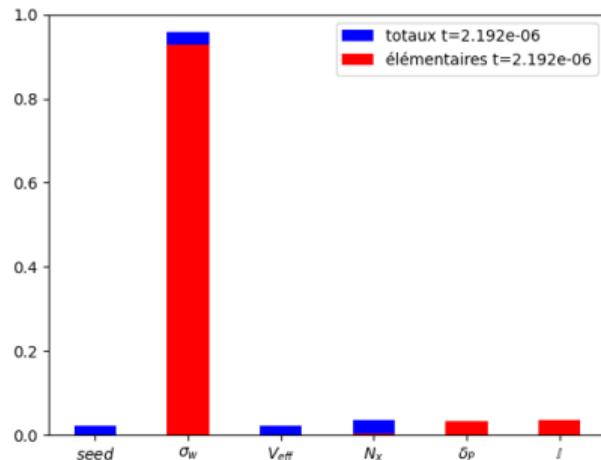
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

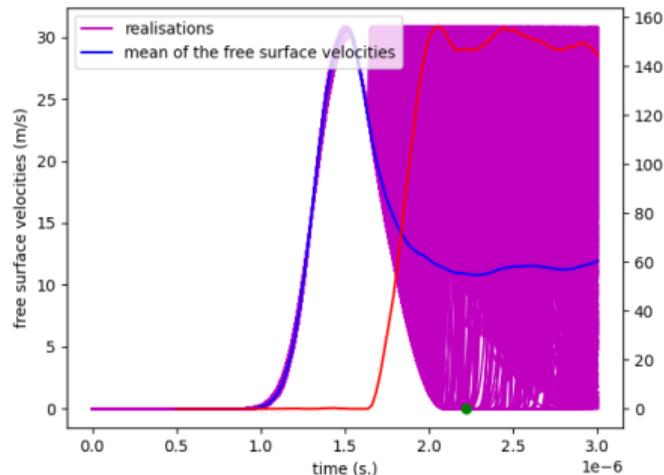
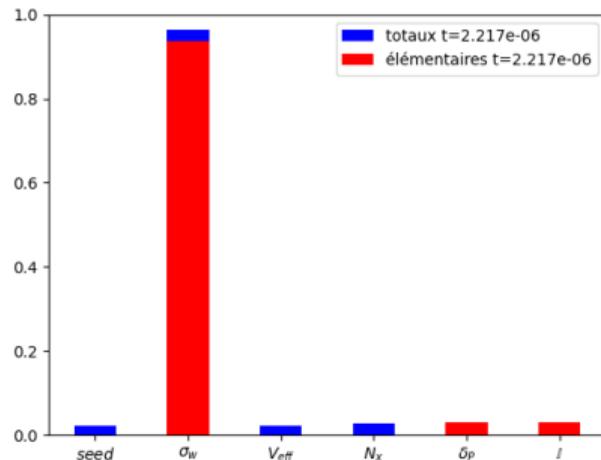
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

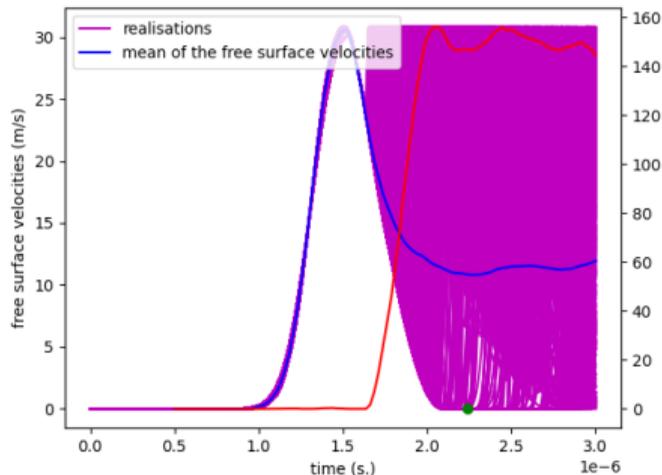
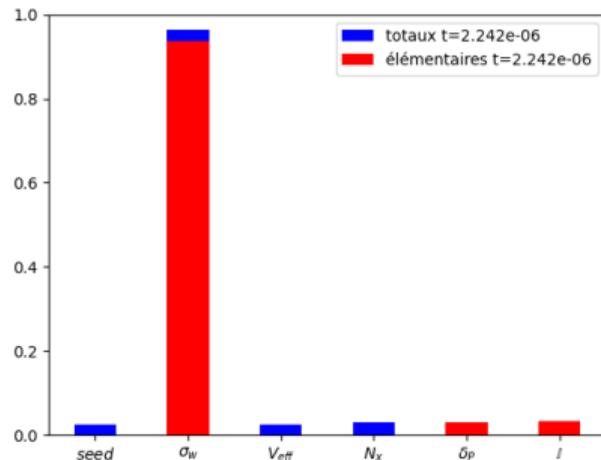
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

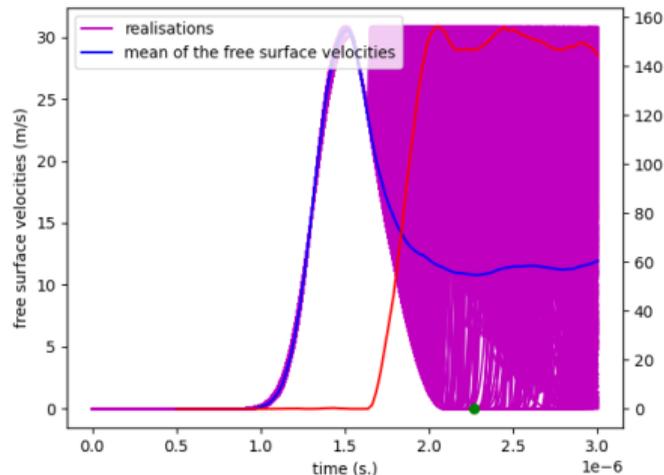
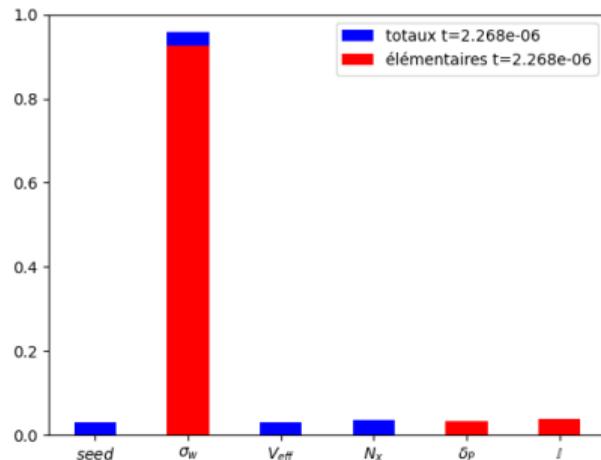
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

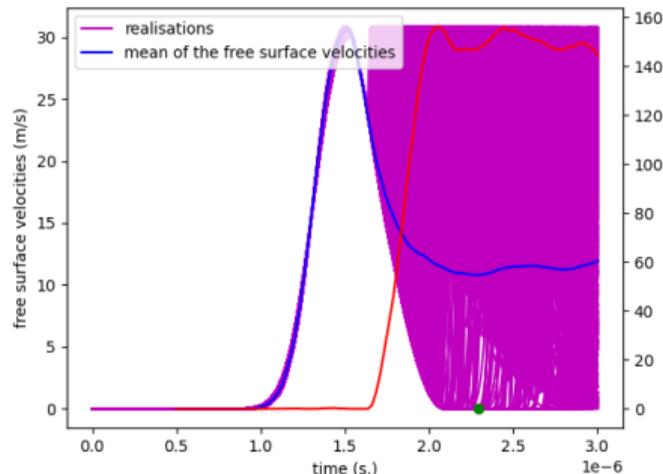
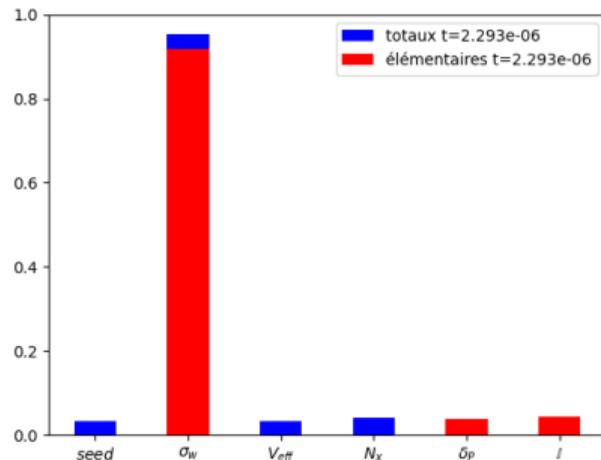
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

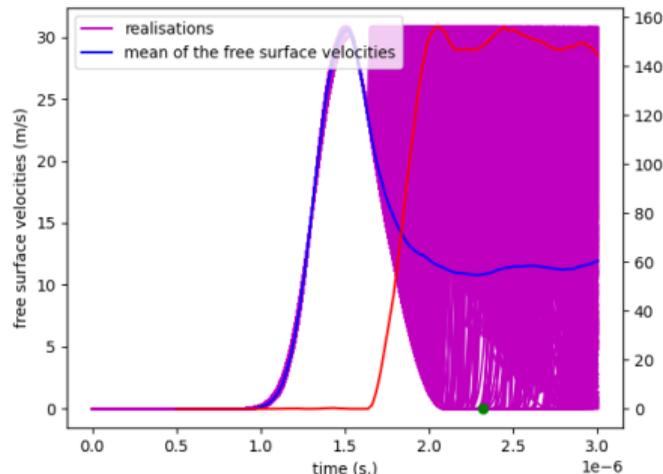
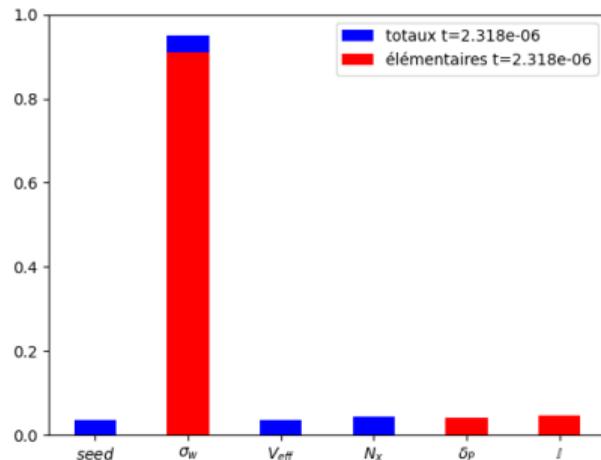
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

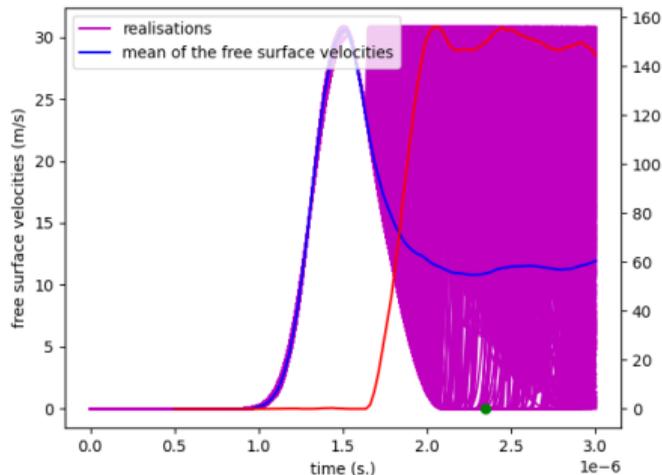
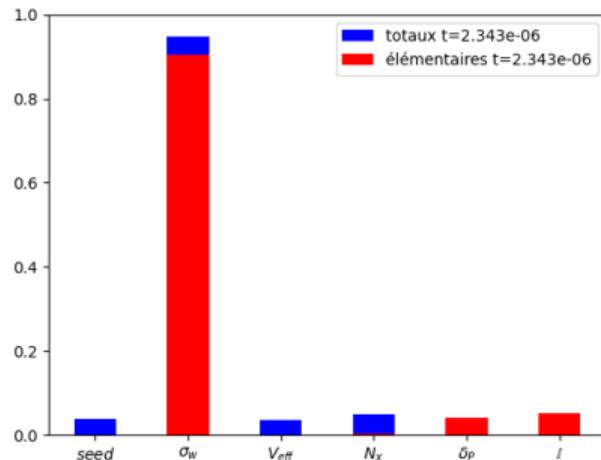
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

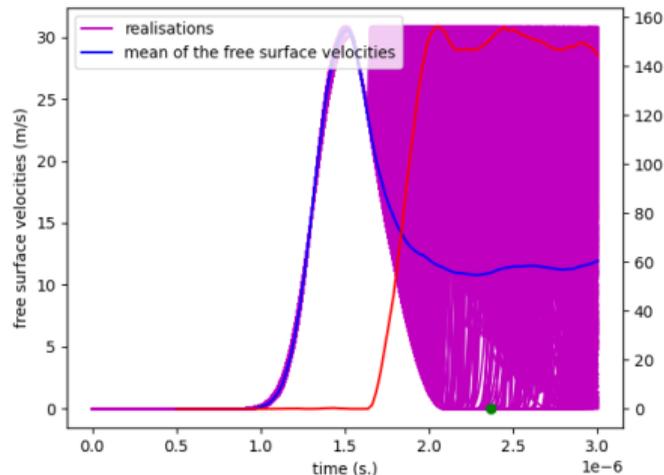
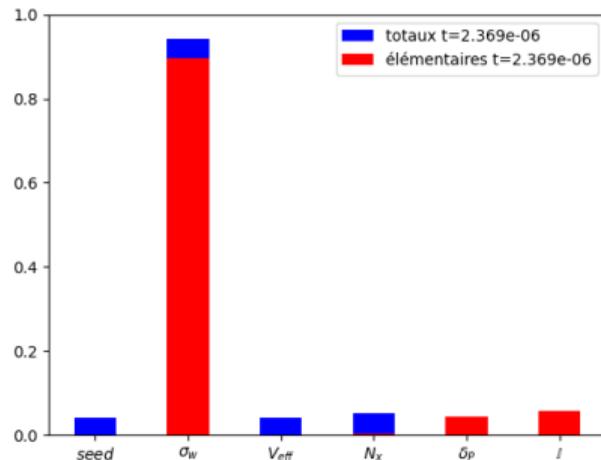
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

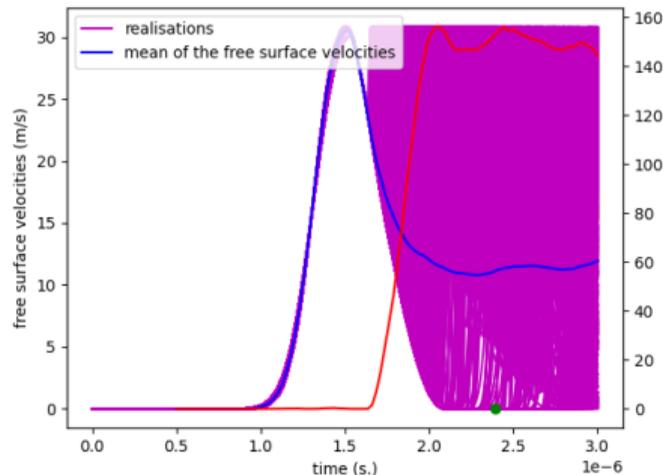
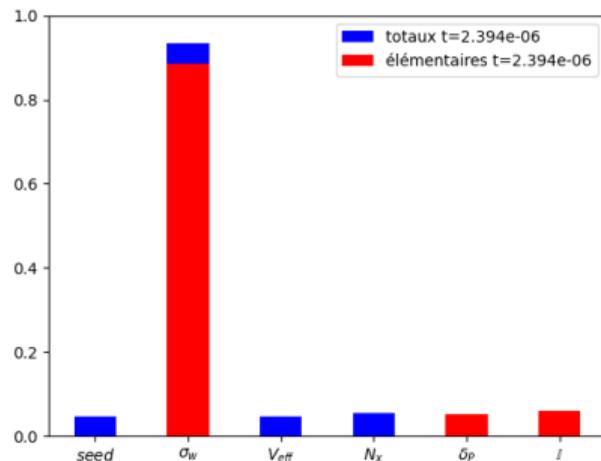
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

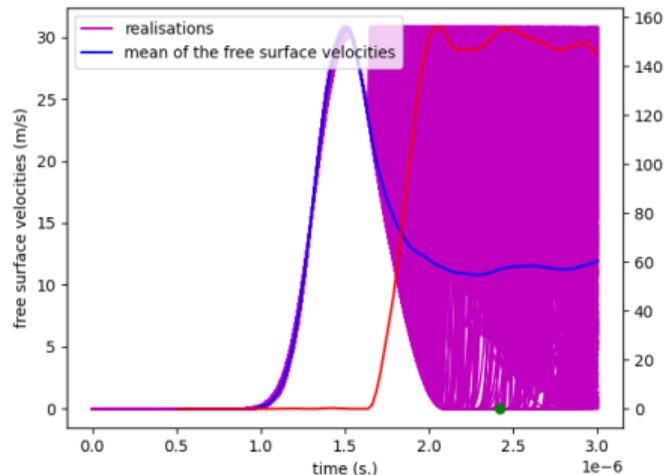
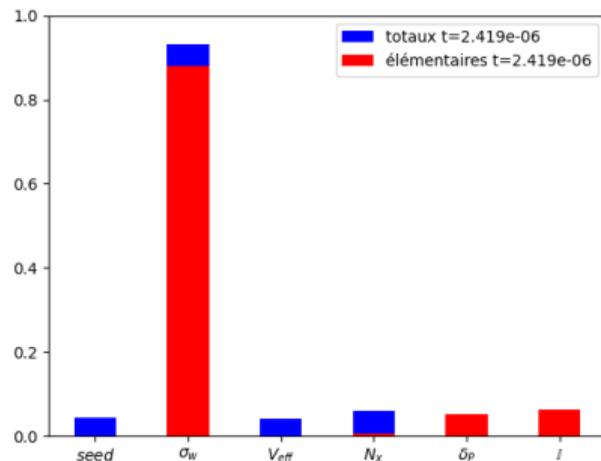
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

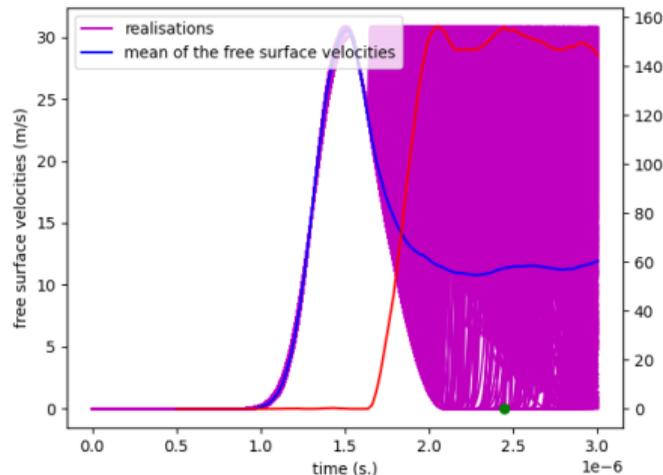
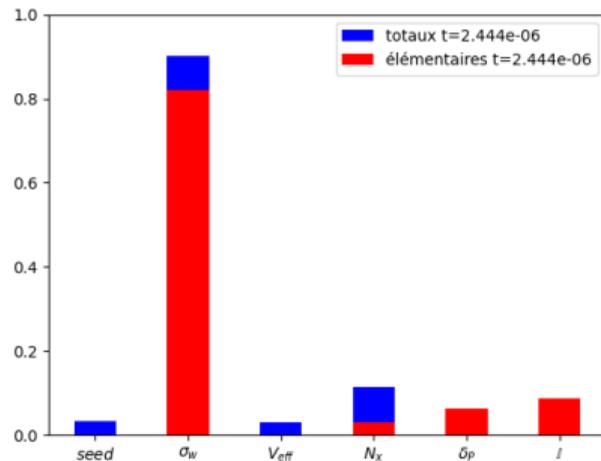
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

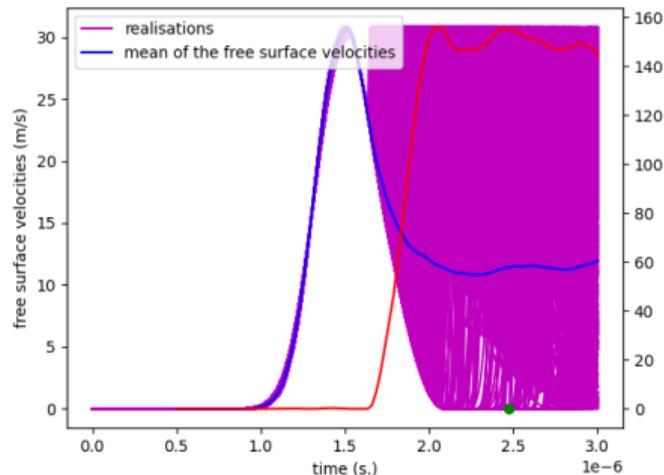
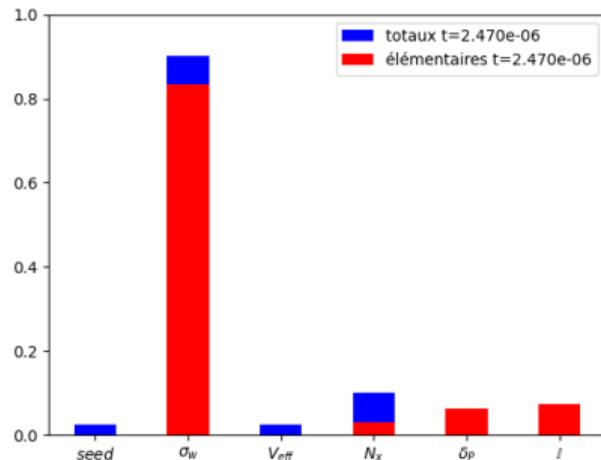
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

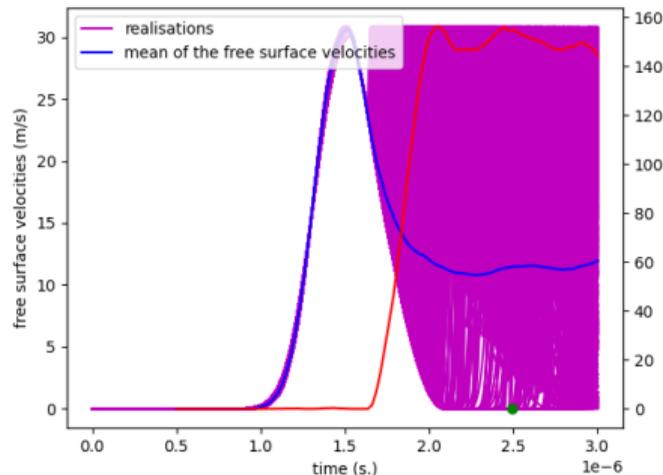
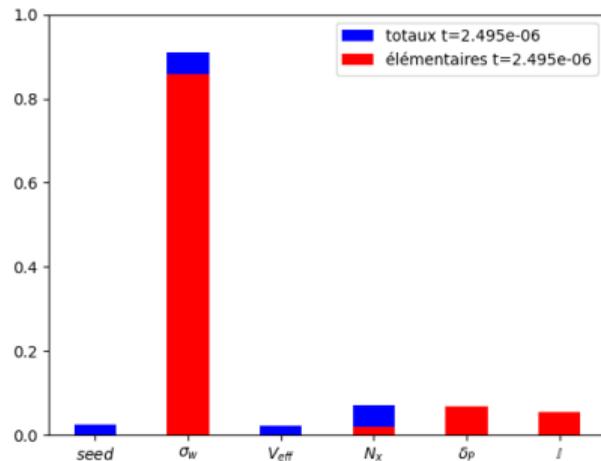
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

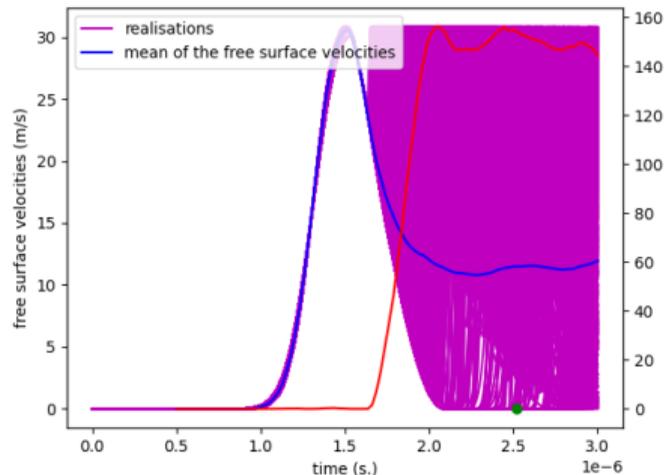
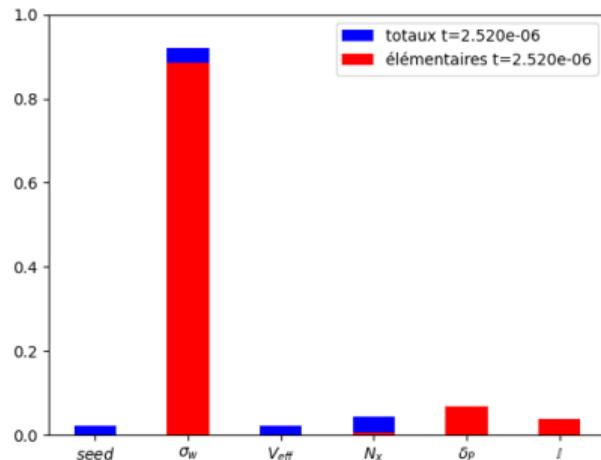
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

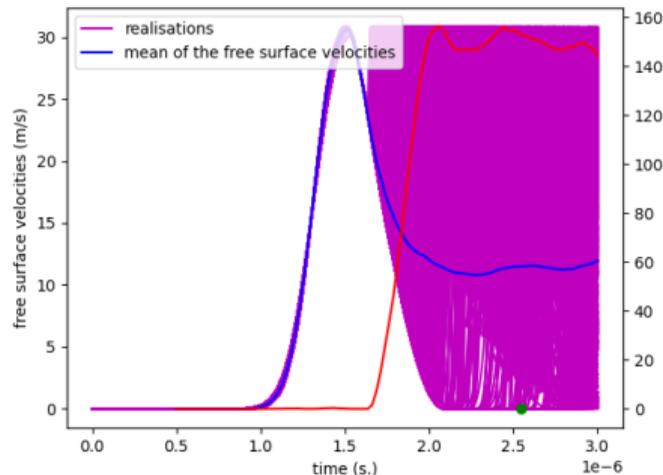
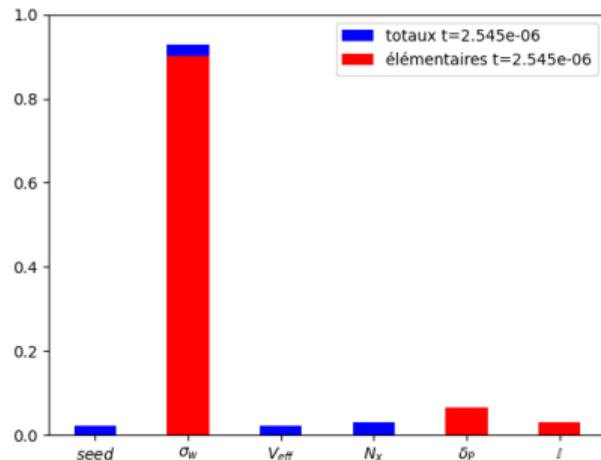
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

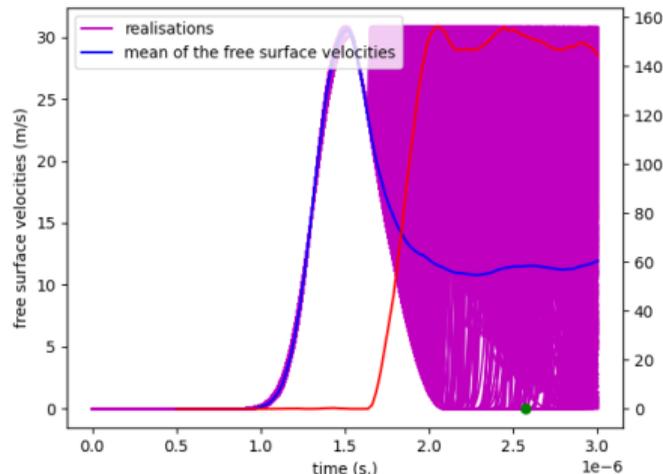
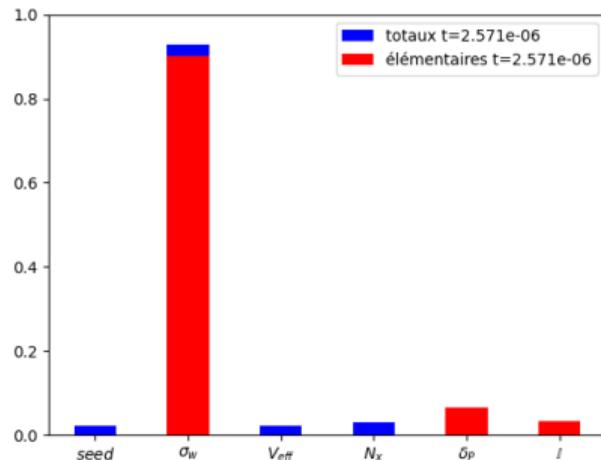
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

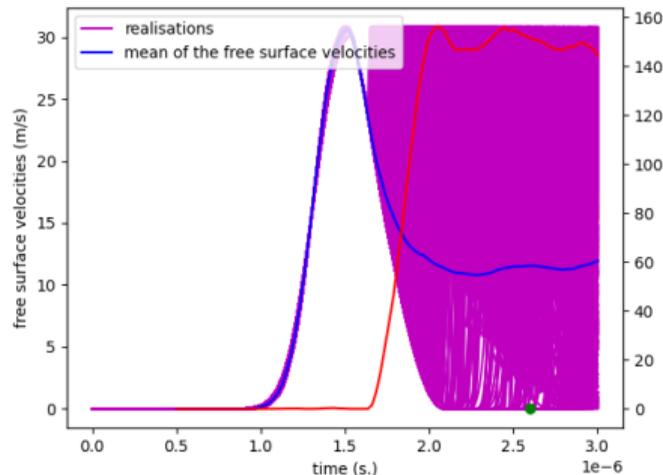
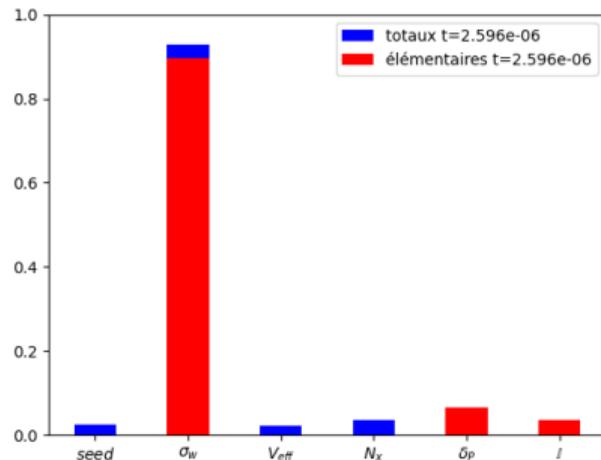
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

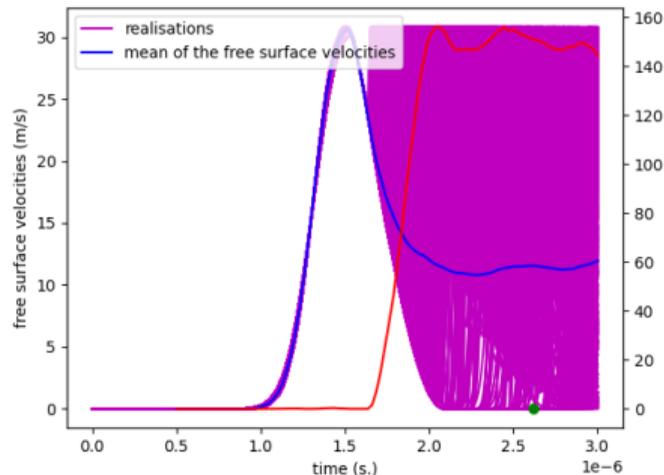
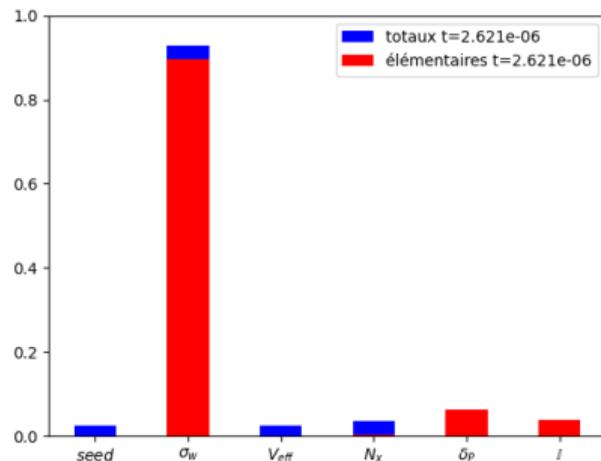
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

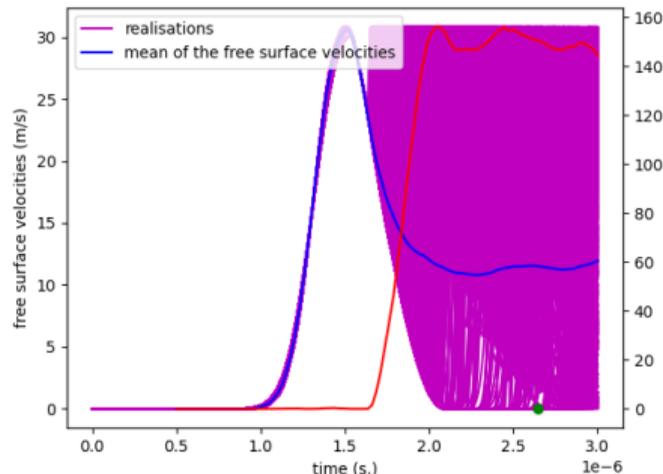
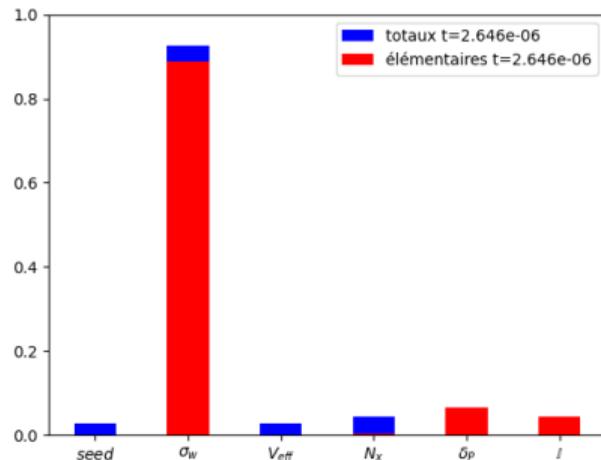
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

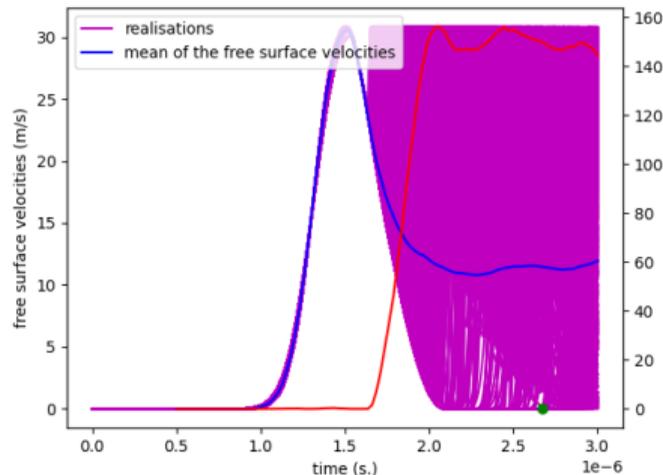
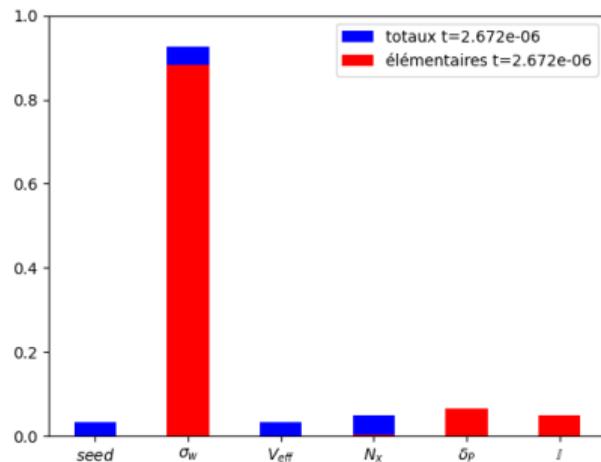
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

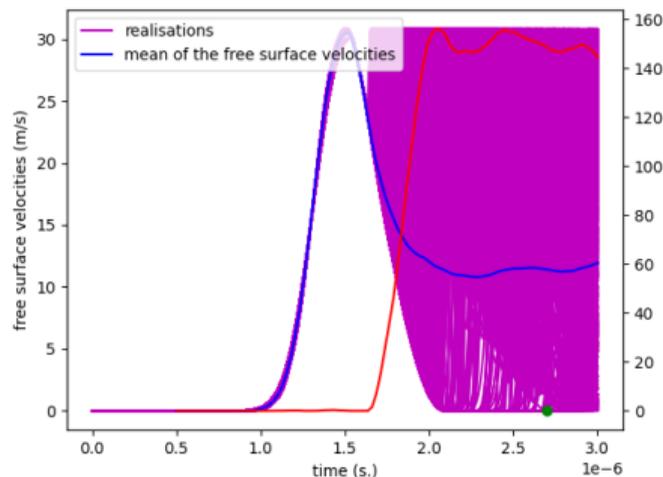
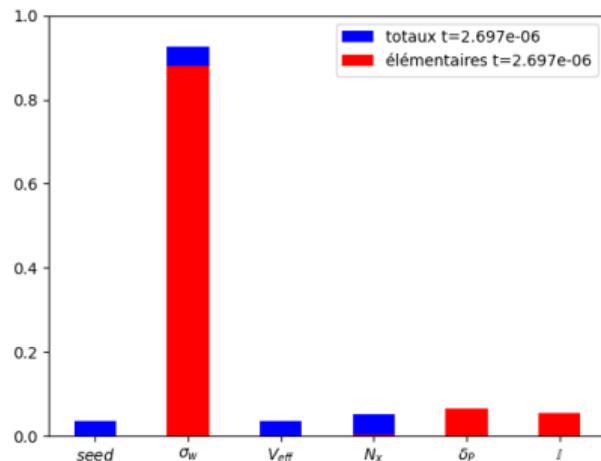
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

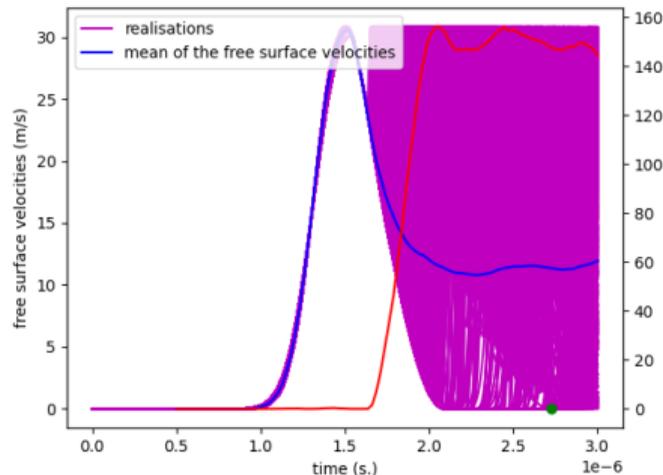
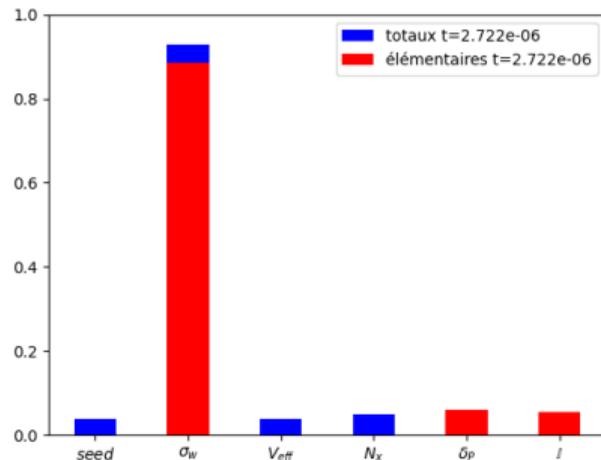
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

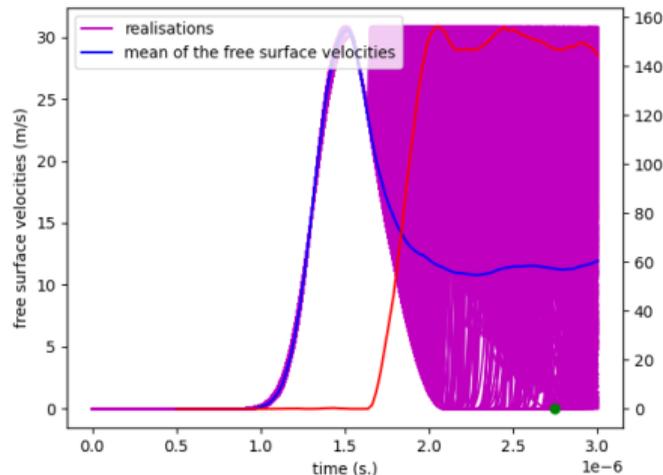
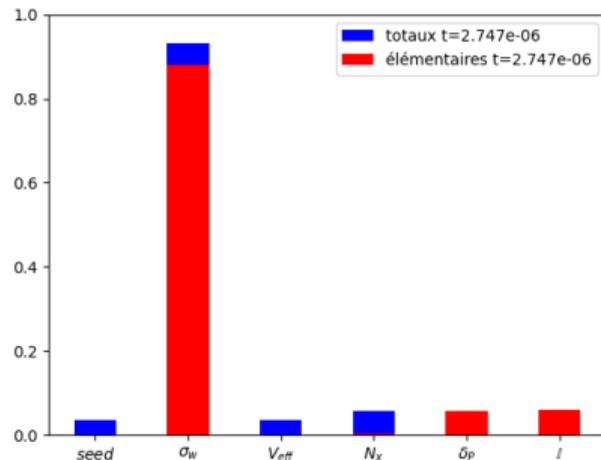
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

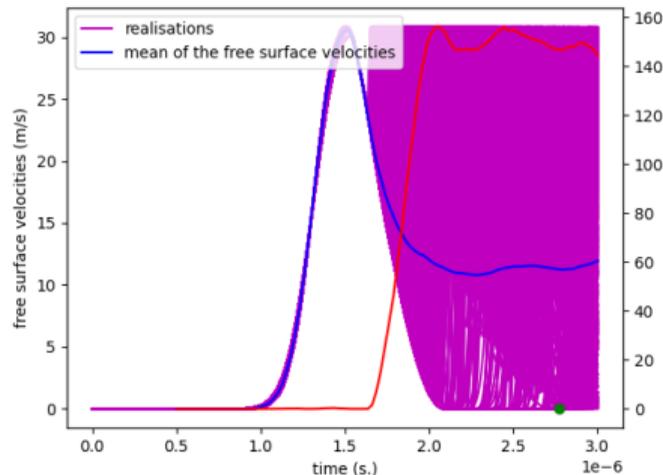
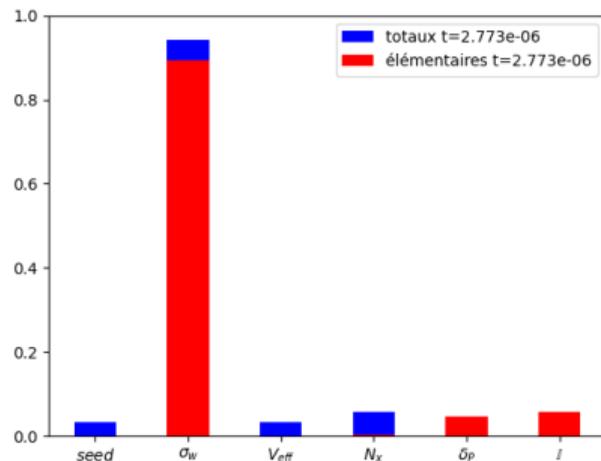
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

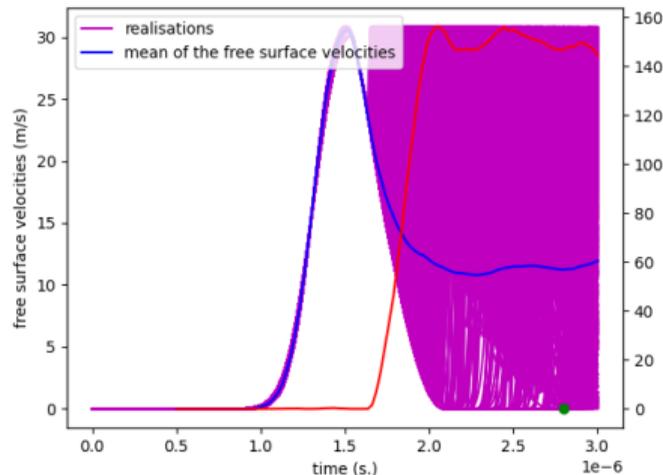
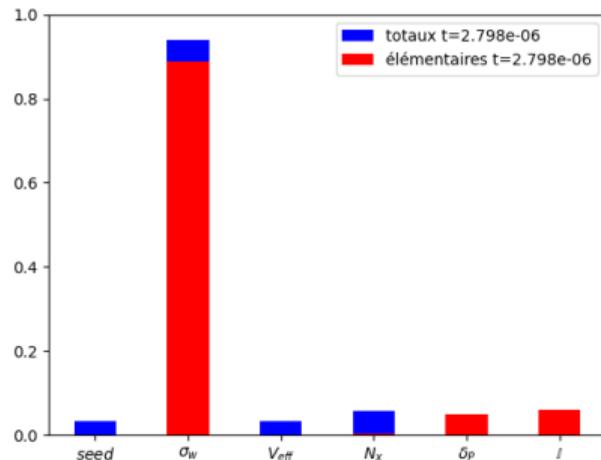
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

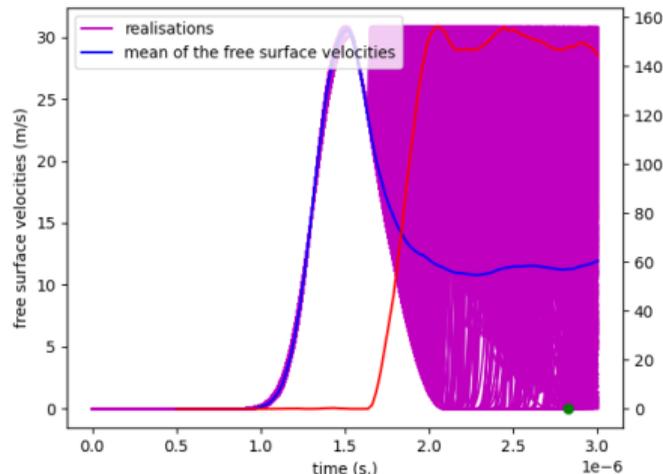
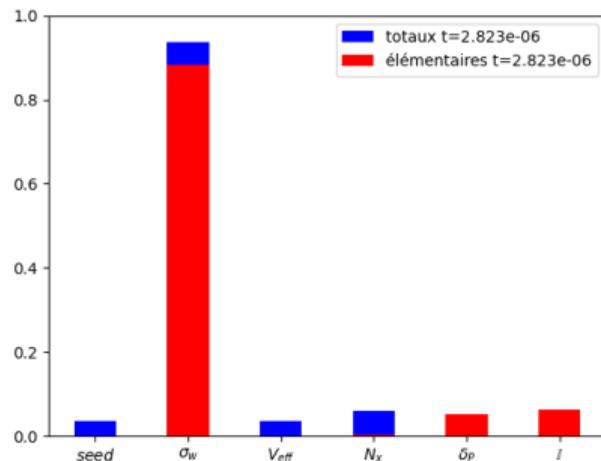
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

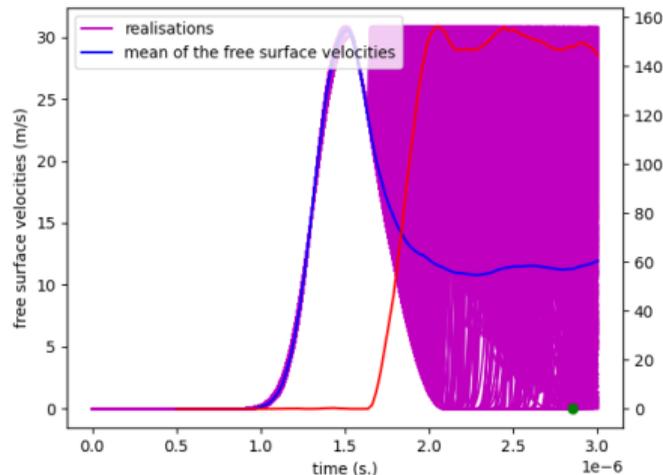
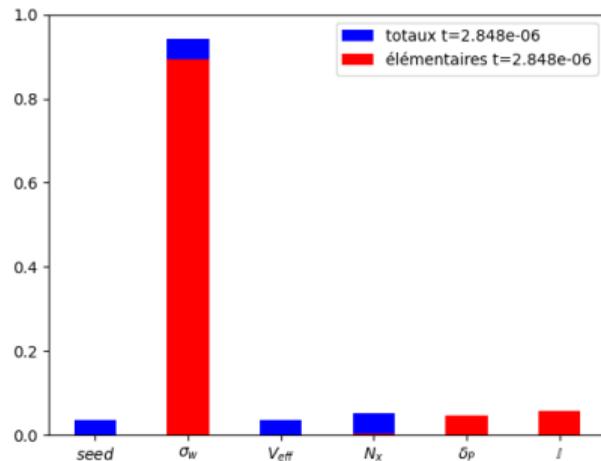
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

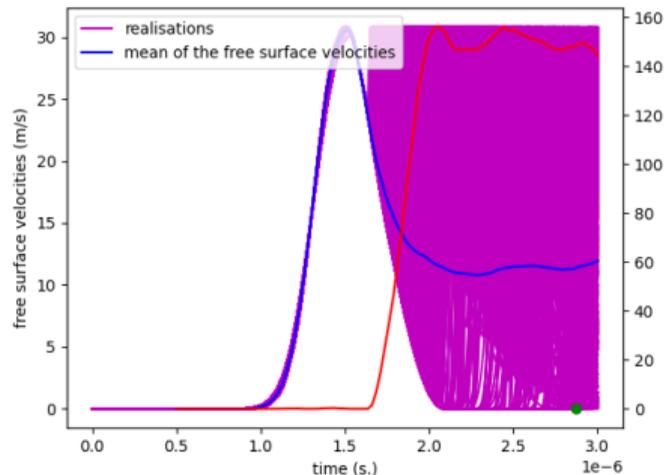
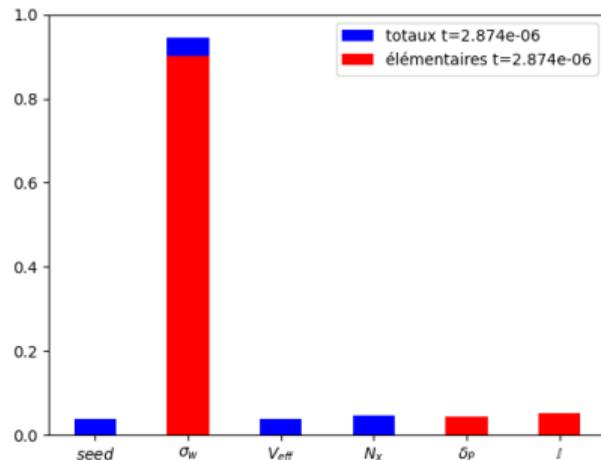
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

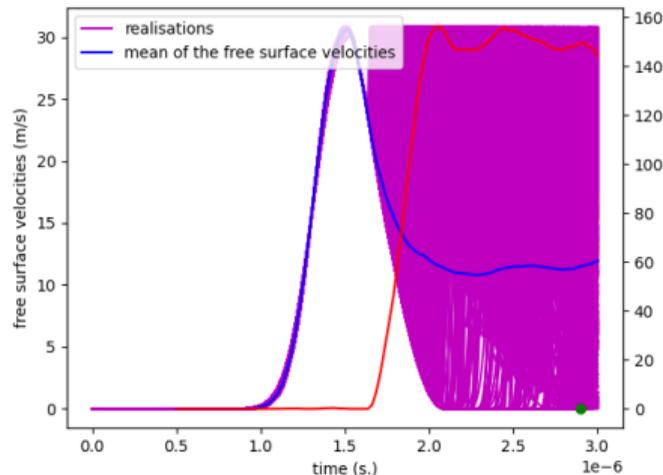
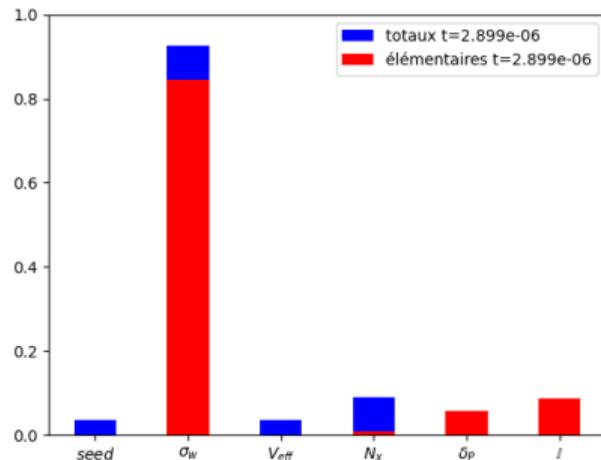
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

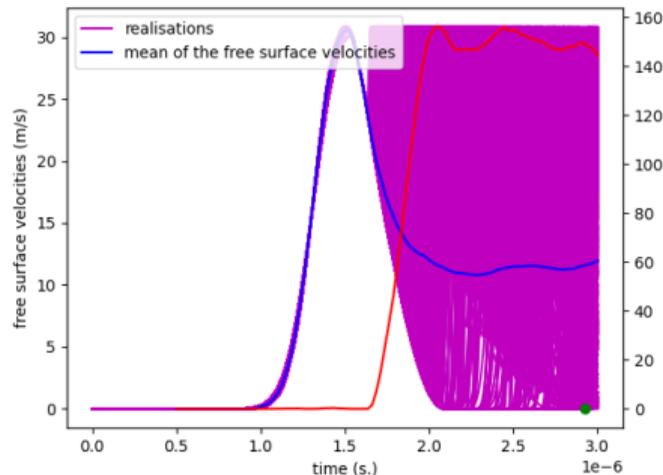
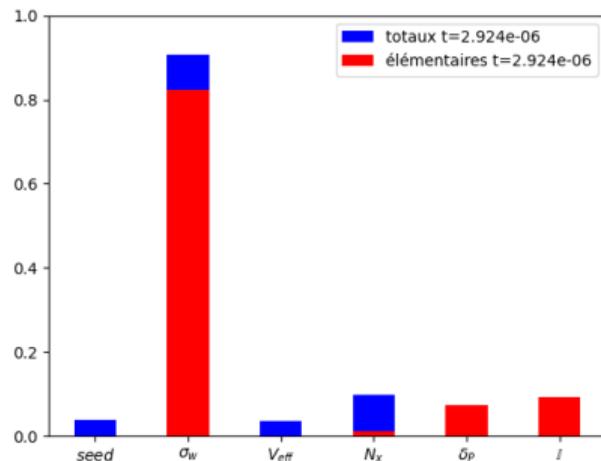
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

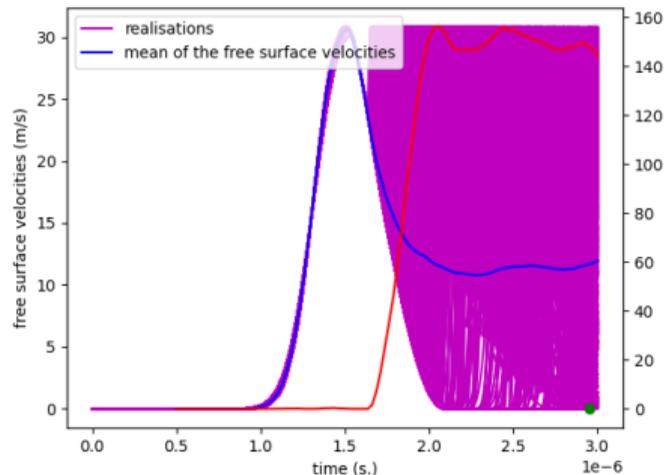
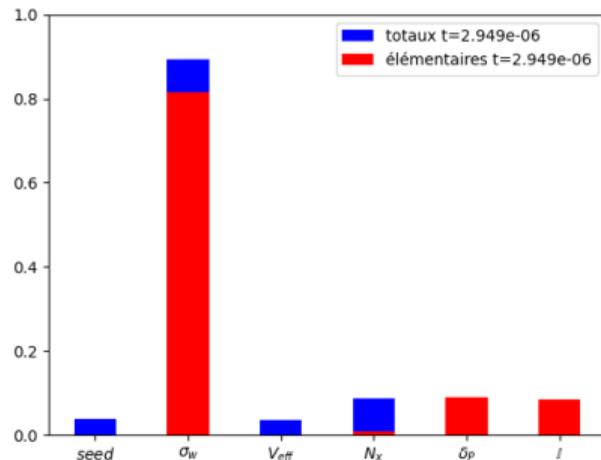
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

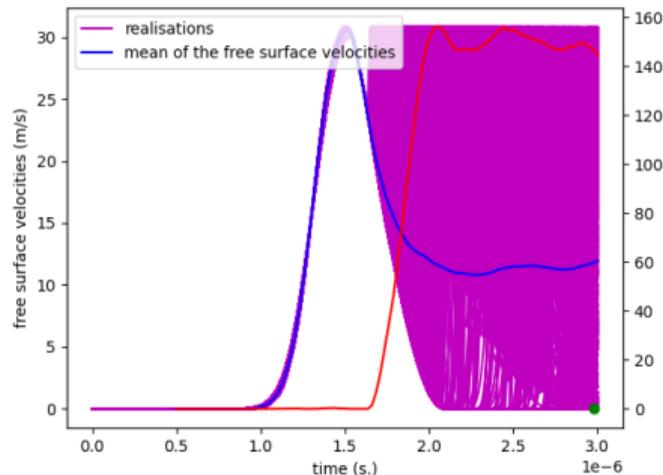
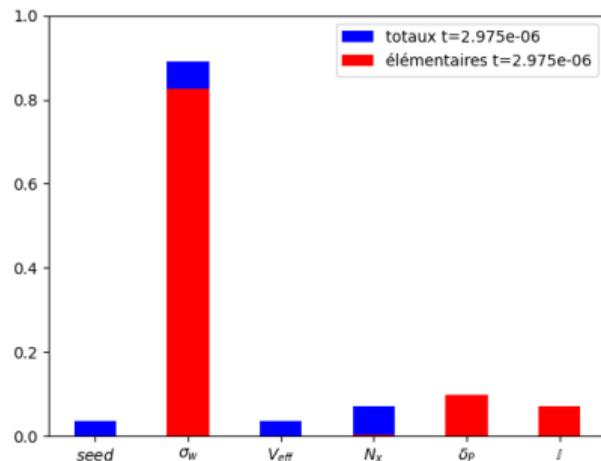
(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)



Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Analyse de sensibilité globale sur XXX (nouvelle version)

(indices de Sobol élémentaires et totaux à plusieurs temps ●)

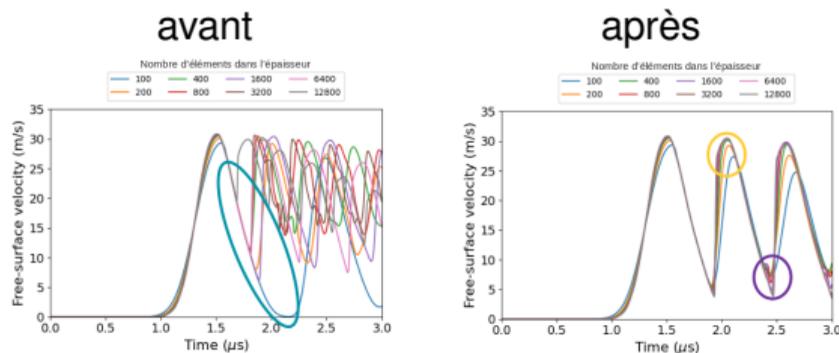


Endo. actif: paramètre physique  $\sigma_w$  prépondérant (fiable)  
(bon comportement: les paramètres physiques sont calibrables)

# Résultat de l'analyse de sensibilité globale sur le modèle XXX

## Analyse de sensibilité sur XXX:

- Le modèle XXX est très intéressant pour nos applications...
- ... Mais présentait un défaut (global) vis-à-vis de la cv. en maillage pour nos applications
- Ce défaut a été mis en évidence par une analyse de sensibilité globale



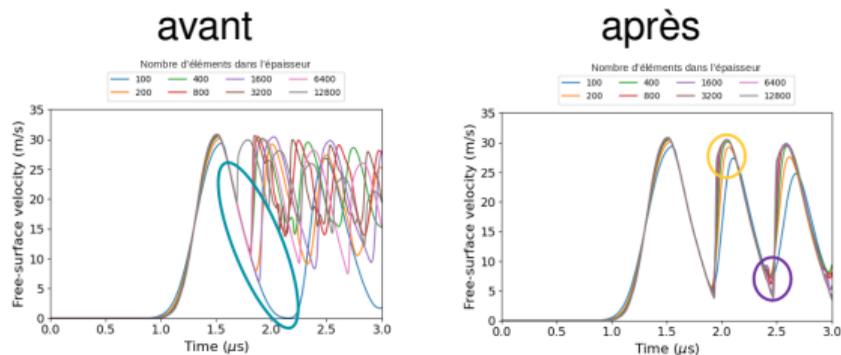
## Aide à la décision $\implies$ choix de travailler sur XXX:

- Travail d'analyse numérique intrusif (identification des sources de non-convergence etc.)
- Correction de XXX (bugs, corrélation spatiale des défauts, accélération de la cv.)
- Test des corrections *via* une analyse de sensibilité globale

# Résultat de l'analyse de sensibilité globale sur le modèle XXX

## Analyse de sensibilité sur XXX:

- Le modèle XXX est très intéressant pour nos applications...
- ... Mais présentait un défaut (global) vis-à-vis de la cv. en maillage pour nos applications
- Ce défaut a été mis en évidence par une analyse de sensibilité globale



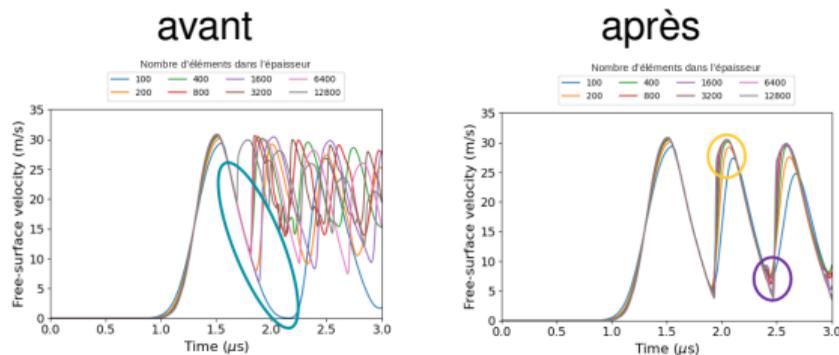
## Perspectives:

- Améliorations (physiques) du modèle de défauts (corrélation informée par tomographies, etc.)
- Calibration (avec prise en compte des incertitudes) de XXX sur des essais (en cours)
- Publication de la nouvelle mouture de XXX? Si le temps le permet...

# Résultat de l'analyse de sensibilité globale sur le modèle XXX

## Analyse de sensibilité sur XXX:

- Le modèle XXX est très intéressant pour nos applications...
- ... Mais présentait un défaut (global) vis-à-vis de la cv. en maillage pour nos applications
- Ce défaut a été mis en évidence par une analyse de sensibilité globale

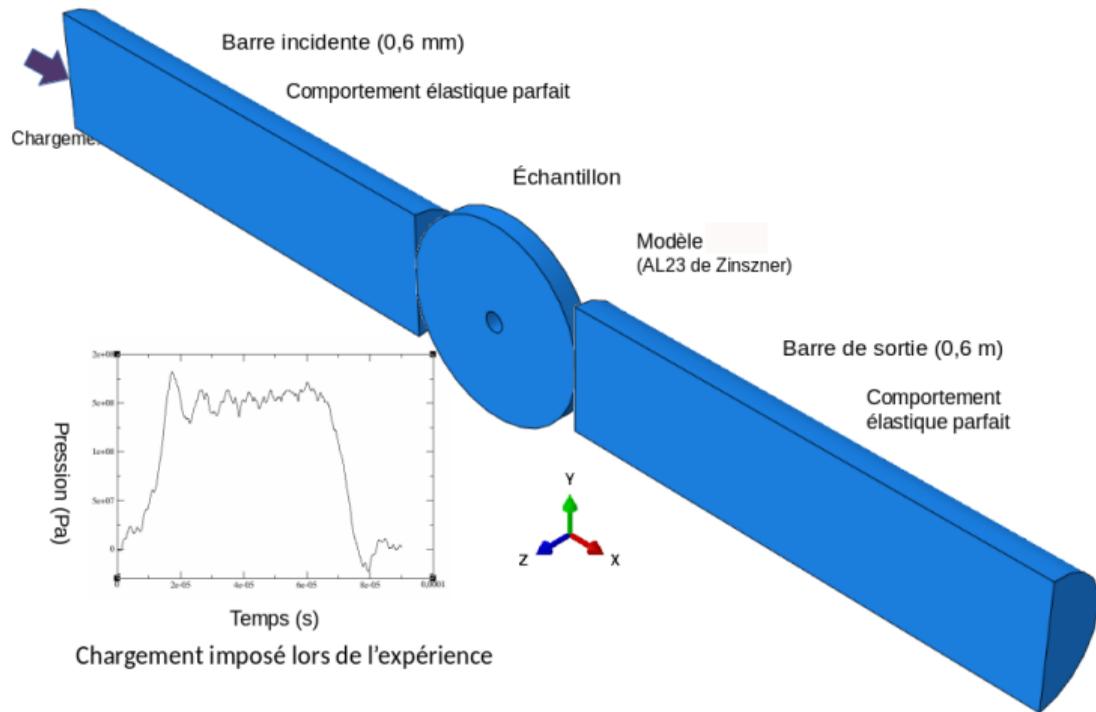


## Les outils 'ETICS' utilisés pour mener à bien cette étude

- Polynômes de Chaos généralisé (avec variables catégorielles/continues) [21]
- Plan d'expériences de type quadrature de Gauss avec validation croisée [5, 17]
- Utilisation des travaux de Sudret/Blatman [6, 16]

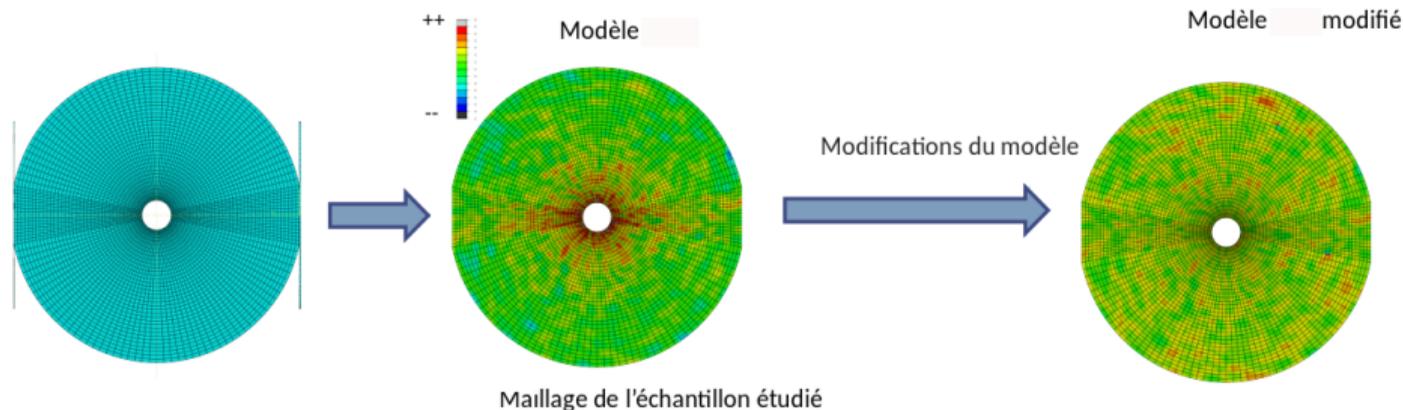
# Essai brésilien et XXX

## Dispositif expérimental



# Essai brésilien et XXX

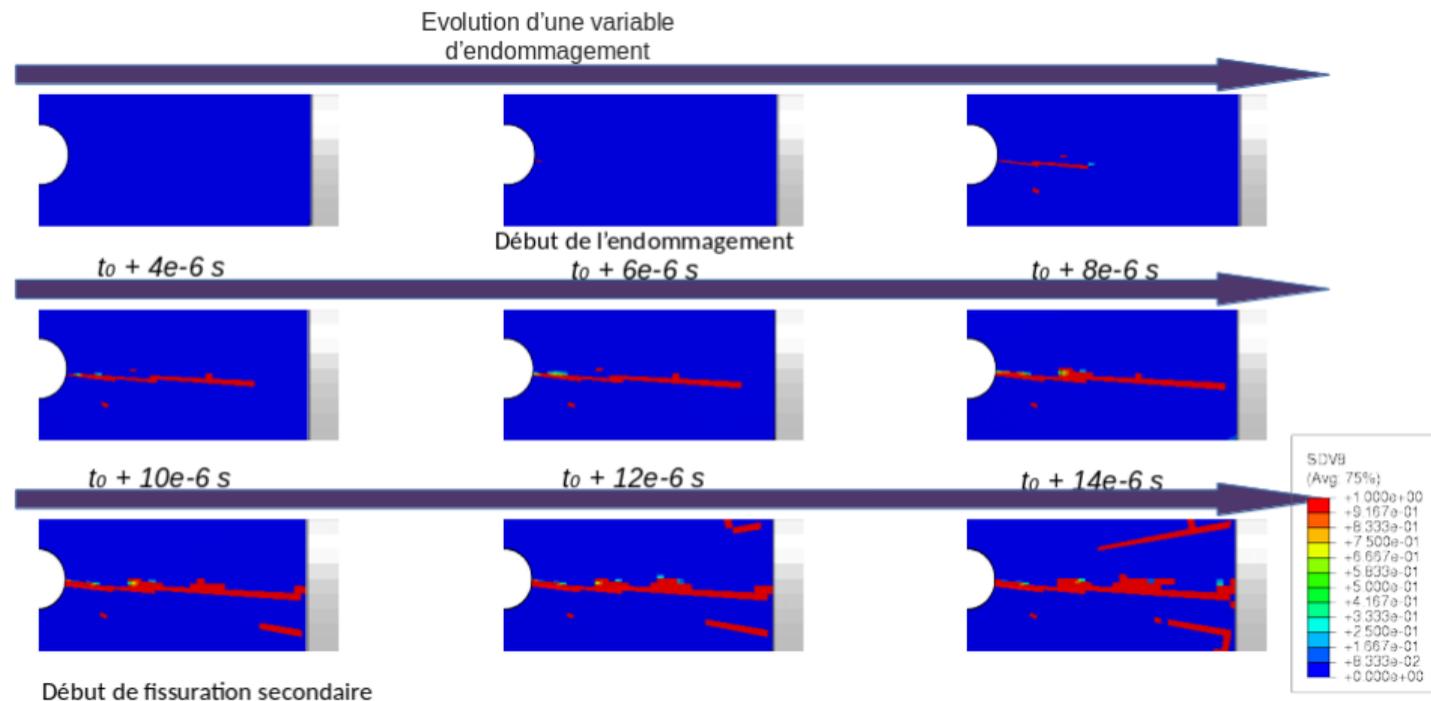
Maillage et distributions de contraintes à rupture (avant et après)



- Besoin de mailles de volume non-uniforme (1<sup>ère</sup> image)
- La non-uniformité des mailles biaisait l'uniformité des contraintes dans le matériau (2<sup>de</sup> image)
- Uniformité des contraintes dans le matériau avec nos modifications (3<sup>ème</sup> image)

# Essai brésilien et XXX

Initiation ( $t = 0$ ) et propagation d'une fissure



# Plan

Etude d'un modèle d'endommagement pour le durcissement

Étude des hyperparamètres dans la conception de réseaux de neurones

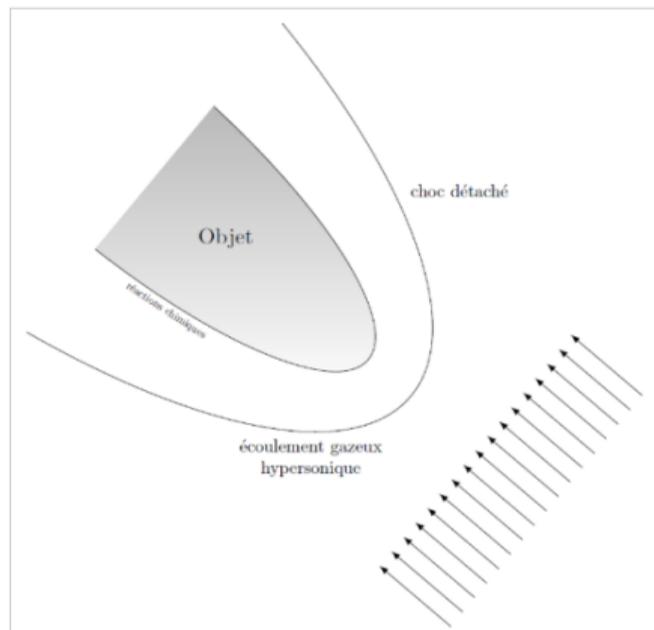
Analyse de sensibilité pour la garantie (sur un exemple simple)

Conclusion



# Un problème de rentrée atmosphérique

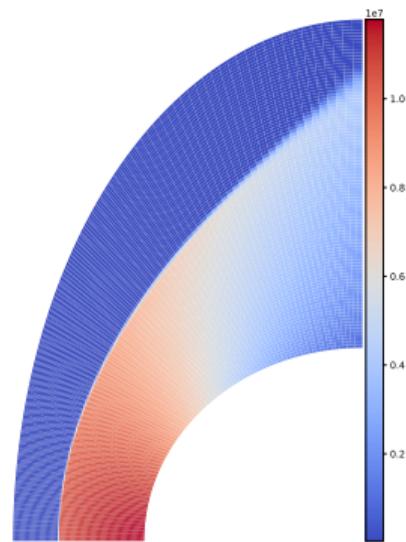
Collaboration avec P. Novello, D. Lugato, S. Peluchon, P. Congedo [11]



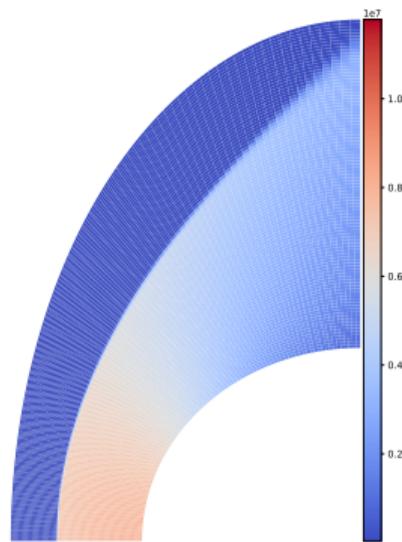
Enjeu: conception d'engins entrants dans l'atmosphère

# Modèle PG vs. Modèle $M_{++}$ vs. modèle hybride

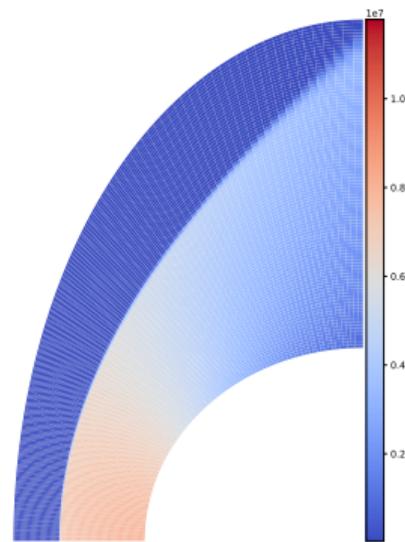
(V. Loridan & F. Chopin sont allés bien au delà des résultats ci-dessous)



PG: 80s.



$M_{++}$ : 4090s.



NN: 136s. (gain  $\times 30$ )

# Conception de réseaux pour accélérer nos applications

L'exemple précédent me semble maintenant loin dans le temps...

- Applications en interne de plus en plus proche du contexte de production
- Une physique plus fine prise en compte plus tôt dans la phase de conception (?)
- F. Chopin obtient déjà des résultats intéressants sur des applications de durcissement

Concernant les défis de l'IA (même si ici, IA est un bien grand mot) ...

- Erreur du réseau estimée, contrôlée (erreur de train+test)  $\implies$  garanties
- Réseau de neurones pour les 1<sup>ères</sup> itérations + appel de  $\mathbf{M}_{++}$  en fin de calcul  $\implies$  garanties
- Log/arrêt si appel du réseau en dehors de la distribution d'apprentissage  $\implies$  garanties
- Recherche parmi de nombreux réseaux candidats  $\nRightarrow$  explicabilité
- Beaucoup d'apprentissages nécessaires  $\nRightarrow$  frugalité
- Recherche de réseaux légers permettant *a priori* d'accélérer les calculs  $\implies$  frugalité

# Conception de réseaux pour accélérer nos applications

L'exemple précédent me semble maintenant loin dans le temps...

- Applications en interne de plus en plus proche du contexte de production
- Une physique plus fine prise en compte plus tôt dans la phase de conception (?)
- F. Chopin obtient déjà des résultats intéressants sur des applications de durcissement

Concernant les défis de l'IA (même si ici, IA est un bien grand mot) ...

- Erreur du réseau estimée, contrôlée (erreur de train+test)  $\implies$  **garanties**
- Réseau de neurones pour les 1<sup>ères</sup> itérations + appel de  $\mathbf{M}_{++}$  en fin de calcul  $\implies$  garanties
- Log/arrêt si appel du réseau en dehors de la distribution d'apprentissage  $\implies$  garanties
- Recherche parmi de nombreux réseaux candidats  $\nRightarrow$  explicabilité
- Beaucoup d'apprentissages nécessaires  $\nRightarrow$  frugalité
- Recherche de réseaux légers permettant *a priori* d'accélérer les calculs  $\implies$  frugalité

# Quelques mots sur le fait d'obtenir une erreur contrôlée (garanties)

Puisque les cours de Benjamin devaient aborder ce sujet... Je me lance...

- Soit  $x \sim dP_X \in \Omega \subset \mathbb{R}^{d_{in}} \rightarrow u(x) \in \mathbb{R}^{d_{out}}$
- On souhaite construire une approximation paramétrée  $u(x) \approx u(x, \theta)$ ,  $\theta \in \mathbb{R}^d$
- Approximation au sens d'une fonction coût:  $x, y \rightarrow L(x, y)$

$$J(\theta) = \int L(u(x), u(x, \theta)) dP_X$$

- En pratique, en supervisé du moins, introduction de  $(x_i, w_i)_{i \in \{1, \dots, N\}}$  tel que

$$\sum_{i=1}^N w_i f(x_i) \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \int f(x) dP_X$$

pour  $f$  dans un certain espace d'intérêt.

- On a alors

$$J(\theta) \approx J_N(\theta) = \sum_{i=1}^N w_i L(u(x_i), u(x_i, \theta))$$

## Quelques mots sur le fait d'obtenir une erreur contrôlée (garanties)

Puisque les cours de Benjamin devaient aborder ce sujet... Je me lance...

- On a alors

$$J(\theta) \approx J_N(\theta) = \sum_{i=1}^N w_i L(u(x_i), u(x_i, \theta))$$

- Mais aussi

$$J(\theta) = J(\theta) - J_N(\theta) + J_N(\theta)$$

- Introduisons maintenant  $(x'_i, w'_i)_{i \in \{1, \dots, N'\}}$  tel que

$$\sum_{i=1}^N w'_i f(x'_i) \xrightarrow{N' \rightarrow \infty} \int f(x) dP_X$$

pour  $f$  dans un certain espace d'intérêt.

- On a alors

$$J(\theta) \approx J'_{N'}(\theta) = \sum_{i=1}^{N'} w'_i L(u(x'_i), u(x'_i, \theta))$$

## Quelques mots sur le fait d'obtenir une erreur contrôlée (garanties)

Puisque les cours de Benjamin devaient aborder ce sujet... Je me lance...

- On a alors

$$J(\theta) \approx J'_{N'}(\theta) = \sum_{i=1}^N w'_i L(u(x'_i), u(x'_i, \theta))$$

- Mais aussi

$$J(\theta) = J(\theta) - J_N(\theta) + J_N(\theta) - J'_{N'}(\theta) + J'_{N'}(\theta)$$

- Si en plus le minimum de  $J_N$  est  $\theta^*$ , on peut ajouter

$$J(\theta) = J(\theta) - J_N(\theta) + J_N(\theta) - J'_{N'}(\theta) + J'_{N'}(\theta) + J_N(\theta^*) - J_N(\theta^*)$$

- En regroupant et en utilisant l'inégalité triangulaire:

$$J(\theta) \leq |J(\theta) - J'_{N'}(\theta)| + |J'_{N'}(\theta) - J_N(\theta)| + |J_N(\theta) - J_N(\theta^*)| + J_N(\theta^*)$$

# Quelques mots sur le fait d'obtenir une erreur contrôlée (garanties)

Puisque les cours de Benjamin devaient aborder ce sujet... Je me lance...

- En regroupant et en utilisant l'inégalité triangulaire:

$$J(\theta) \leq \underbrace{|J(\theta) - J'_{N'}(\theta)|}_{\text{err. d'intégration}} + \underbrace{|J'_{N'}(\theta) - J_N(\theta)|}_{\text{stabilité}} + \underbrace{|J_N(\theta) - J_N(\theta^*)|}_{\text{err. d'optimisation}} + J_N(\theta^*)$$

- Erreur d'intégration: si le plan d'expérience  $(x_i, w_i)_{i \in \{1, \dots, N\}}$  est un plan MC

$$|J(\theta) - J'_{N'}(\theta)| \sim \mathcal{FG} \left( 0, \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right)$$

( $\mathcal{FG}$  est pour 'folded gaussian')

⇒ Il est donc possible de la majorer (TCL) à 95% (par exemple)

- Si autre plan d'expérience: au cas par cas  
(cf. exposé de P. Lécuyer à ETICS 2024, de C. Oath ETICS 20?? par ex.)

# Quelques mots sur le fait d'obtenir une erreur contrôlée (garanties)

Puisque les cours de Benjamin devaient aborder ce sujet... Je me lance...

- En regroupant et en utilisant l'inégalité triangulaire:

$$J(\theta) \leq \underbrace{|J(\theta) - J'_{N'}(\theta)|}_{\text{err. d'intégration}} + \underbrace{|J'_{N'}(\theta) - J_N(\theta)|}_{\text{stabilité}} + \underbrace{|J_N(\theta) - J_N(\theta^*)|}_{\text{err. d'optimisation}} + J_N(\theta^*)$$

- Le terme 'stabilité' est calculable:

$$J'_{N'}(\theta) - J_N(\theta) = \int L(u(x), u(x, \theta)) [dP_X^N - dP_X^{N'}]$$

avec distribution de 'train'  $dP_X^N(x) = \sum_{i=1}^N w_i \delta_{x_i}(x)$  et de 'test'  $dP_X^{N'}(x) = \sum_{i=1}^{N'} w'_i \delta_{x'_i}(x)$

⇒ permet de contrôler la dérivée (!?) du modèle

- Besoin d'avoir des distributions 'train' et 'test' bien équilibrée (vérification avec MMD + test d'hyp. stat., cf. cours de C. Oath ETICS 20??)

# Quelques mots sur le fait d'obtenir une erreur contrôlée (garanties)

Puisque les cours de Benjamin devaient aborder ce sujet... Je me lance...

- En regroupant et en utilisant l'inégalité triangulaire:

$$J(\theta) \leq \underbrace{|J(\theta) - J'_{N'}(\theta)|}_{\text{err. d'intégration}} + \underbrace{|J'_{N'}(\theta) - J_N(\theta)|}_{\text{stabilité}} + \underbrace{|J_N(\theta) - J_N(\theta^*)|}_{\text{err. d'optimisation}} + J_N(\theta^*)$$

- Le terme d'erreur d'optimisation ...

$$|J_N(\theta) - J_N(\theta^*)|$$

est à ma connaissance impossible à majorer...

⇒ En pratique, si  $\hat{\theta}$  est la sortie d'un optimiseur, il ne reste que

$$J(\hat{\theta}) \leq \underbrace{|J(\hat{\theta}) - J'_{N'}(\hat{\theta})|}_{\text{err. d'intégration}} + \underbrace{|J'_{N'}(\hat{\theta}) - J_N(\hat{\theta})|}_{\text{stabilité}} + J_N(\hat{\theta})$$

- Et il est donc possible de majorer la fonction de coût en  $\hat{\theta}$ ...  
(On ne peut pas tjs garantir qu'il n' $\exists$  pas mieux, cf. mod. non-linéaire, A. Nouy ETICS 20??)

# Quelques mots sur le fait d'obtenir une erreur contrôlée (garanties)

Puisque les cours de Benjamin devaient aborder ce sujet... Je me lance...

- En pratique, après apprentissage et obtention de  $\hat{\theta}$ , les erreurs de la forme

$$J(\hat{\theta}) \leq \underbrace{|J(\hat{\theta}) - J_{N'}(\hat{\theta})|}_{\text{err. d'intégration}} + \underbrace{|J_{N'}(\hat{\theta}) - J_N(\hat{\theta})|}_{\text{stabilité}} + J_N(\hat{\theta})$$

sont celles que j'utilise pour comparer mes modèles

# Jusqu'à présent... Présentation d'une "success story" mais...

Voici ce à quoi fait face un utilisateur d'un framework de ML...

Nécessité de choisir un grand nombre d'hyperparamètres  $H$  impactant l'erreur  $\mathcal{E}(H)$

- La fonction de coût  $L$ ,  
( $L^2$ ,  $L^1$ , cross-entropy, physics-informed...  $> 4$  possibilités)
- Le nombre de couches et de neurones  $n_k$  dans la couche  $k$ ,  
(1, 2, ...256...  $\gg 20$  possibilités)  $\times$  (1, 2, ...256...  $\gg 20$  possibilités)
- La fonction d'activation  $\sigma$ ,  
(Sigmoid, ReLU, tanh, ReLU+identity mapping...  $\gg 3$  possibilités)
- L'architecture ...  
(fully connected, convolutional, autoencoder, resnet, RBM...  $\gg 4$  possibilités)
- ... en plus des hyperparamètres internes à l'architecture,  
(fully connected ( $n_k$  in layer  $k$ ?  $\sigma_k$  in layer  $k$ ?)...  $\gg 2$  possibilités)
- L'optimiseur et ses hyperparamètres,  
(SGD, ADAM, ADAGRAD, ADADELTA...  $\gg 4$  possibilités avec 1 à  $> 4$  hyperparamètres)
- + Dropout (+rate  $\in [0, 1]$ )? + minibatch (+size  $\in \{1, \dots, N\}$ )? + ...

Tous ces hyperparamètres étaient pré-tunés lorsqu'on clone un répo

## Jusqu'à présent... Présentation d'une "success story" mais...

... Un nombre considérable de configuration à tester pour la conception du réseau

$$\text{Nombre de configurations qu'on aimerait tester} \\ > 4 \times 20 \times 20 \times 3 \times 4 \times 2 \times 4 \times 2 \times 10 = 3.072 \times 10^6 \dots$$

- Ce nombre est une borne inférieure...  
(tous les jours une nouvelle architecture, une nouvelle activation, un nouvel optimiseur...)
- L'apprentissage des poids  $\theta$  prend un certain temps...  
(les temps d'apprentissage croissent avec le # de données et la dimension)
- Ne pas oublier de changer la graine pour chaque configuration...  
(optimisation non-convexe)  
(# de minima locaux croissant exponentiellement avec le # de données et la dimension)  
(nombre  $N_{\text{seed}}$  de graines? 10, 100, 1000?)

## Jusqu'à présent... Présentation d'une "success story" mais...

... Un nombre considérable de configuration à tester pour la conception du réseau

### Comment faire en pratique?

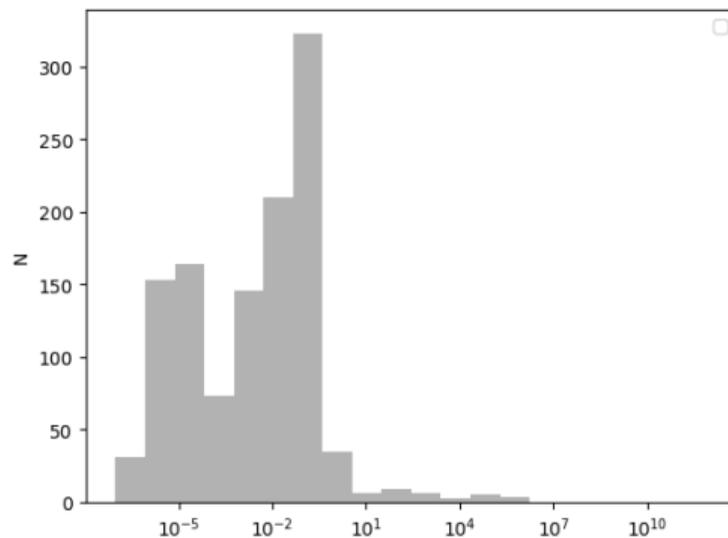
- Tester  $> 3 \times 10^6$  configurations?  
(Impossible! Pas assez de GPUs...)
- Pouvons-nous facilement identifier des configurations pertinentes?  
(exploiter la littérature fournie pour identifier de bonnes pratiques?)

Idée [10]: concevoir des réseaux comme concevoir un engin sous incertitudes...

- $H \in \Omega_H \subset \mathbb{R}^{d_H}$  les hyperparamètres (précités),
- Déterminer  $H \rightarrow \mathcal{E}(H) \in \mathbb{R}^+$ , l'erreur pour un jeu d'hyperparamètres  $H$ .

# Etude des erreurs $H \rightarrow \mathcal{E}(H)$ en fonction des hyperparamètres $H$

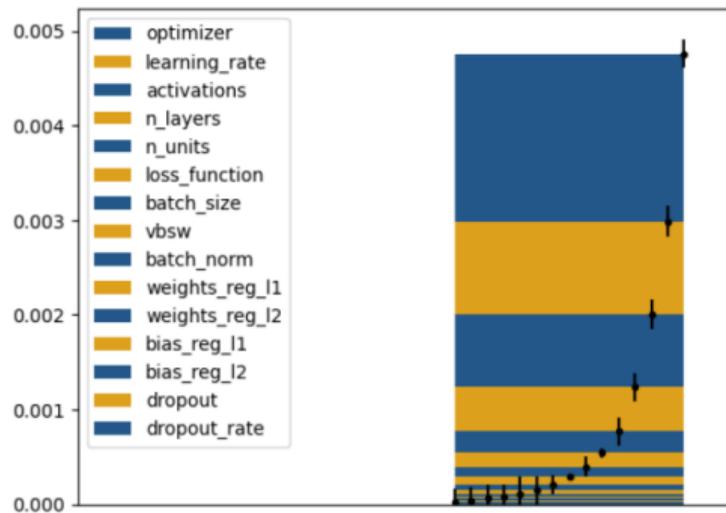
Distribution des erreurs  $\mathcal{E}(H)$  par réseaux de neurones sur  $\mathbf{M}_{++}$



- Un support avec plusieurs échelles (de  $10^{-8}$  à  $10^7$ ) d'erreurs
  - Question: peut-on identifier les hyperparamètres qui *expliquent* les erreurs faibles?
- ⇒ Question relativement classique en analyse d'incertitudes [15]
- ⇒ Analyse de sensibilité à but orienté [15] pour l'aide à la conception

# Quels $H$ expliquent d'avoir $\mathcal{E}(H)$ faible?

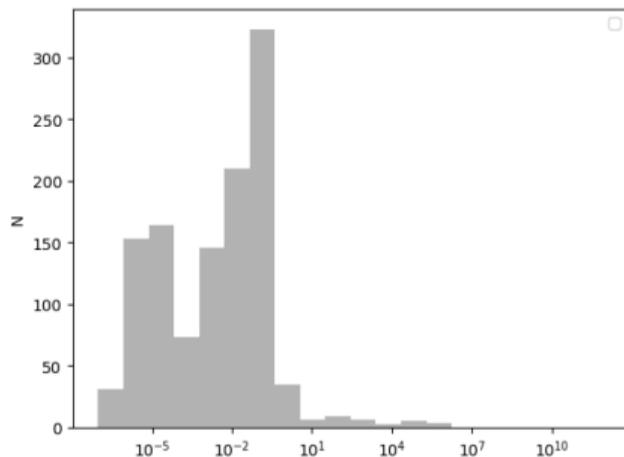
Analyse de sensibilité à but orienté (HSIC [18], noyau gaussien...) sur les erreurs les plus faibles



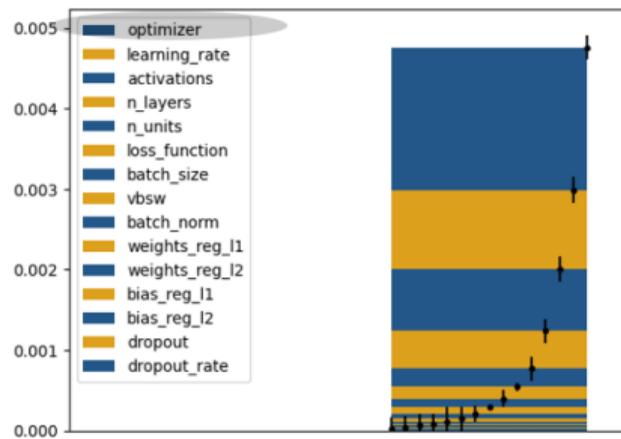
- L'optimiseur/learning rate/activation *expliquent* le plus d'avoir des erreurs faibles...
  - Réduction de dimension sur indices + optimisation sans gradient en dimension faible [15]
- ⇒ Le métamodèle du code hybride a été obtenu en appliquant cette méthodologie

# Contexte et motivations

Construire des réseaux de neurones efficaces n'est pas toujours facile [10]



Distrib. des erreurs  $\mathcal{E}(H)$



Sensibilité aux hyperparamètres  $H$

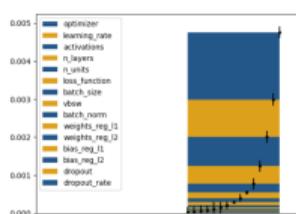
- Des erreurs allant de  $10^{-6}$  à  $10^7$ ... Beaucoup d'apprentissages instables (NaN)...
- Construire un réseau efficace nécessite beaucoup de temps "ingénieur"...
- L'optimiseur est l'hyperparamètre le plus important...

# Influence des hyperparamètres des réseaux de neurones

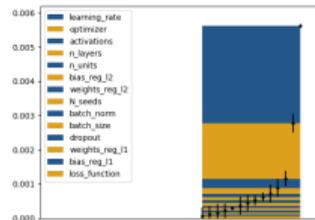


L'optimiseur est *très souvent* identifié comme étant le plus important (le meilleur change)

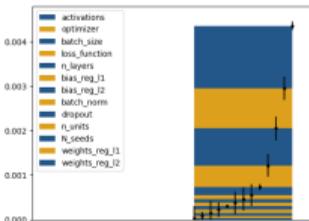
HSIC pour les meilleurs 10% d'erreurs pour plusieurs problèmes



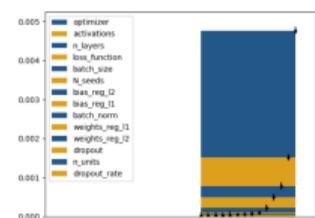
M<sub>++</sub>



Bateman equations



MNIST



Runge

Aide à la décision: analyse des optimiseurs pour maîtriser l'apprentissage [4, 1, 3, 2]

# Conclusion

Aide à la décision: sur la base des résultats de l'analyse

⇒ décision de lancer la thèse de Bilel Bensaid sur les optimiseurs

Les outils 'ETICS' utilisés pour mener à bien cette étude

- Encore une fois le super livre de Da Veiga, Gamboa, Iooss, Prieur [17]
- Les travaux de Sébastien Da Veiga sur les indices HSIC [18]
- Les travaux de Spagnol, Le Riche, Da Veiga sur l'AS globale pour de l'optimisation [15]

# Plan

Etude d'un modèle d'endommagement pour le durcissement

Étude des hyperparamètres dans la conception de réseaux de neurones

**Analyse de sensibilité pour la garantie (sur un exemple simple)**

Conclusion



# Garantir sous incertitudes

- Probabilité(s) de dépassement de seuil:
  - supposons des seuils (en contraintes min / max, endo.) définis  $u_0$
  - La probabilité de dépassement de seuil est définie par

$$p_f = \int \mathbf{1}_{[u_0, \infty[}(u(X)) dP_X.$$

- Considérations importantes/contexte:
  - $d \gg 1$ ,
  - $X \mapsto u(X)$  peu régulière (physique à seuil),
  - Le code: robuste, pas trop coûteux, lancements parallèle

## ⇒ Choix d'utiliser une méthode Monte Carlo

- faible vitesse de convergence mais peu sensible à la dimension  $d$  et à la régularité
- permet d'apporter un niveau de confiance en l'estimation de  $p_f$   
(Th. central limite assurant de fournir un interval de confiance à 95% sur  $p_f$  par exemple)
- ATTENTION: méthode peu précise pour des probabilités faibles, cf. [20, 7] par ex.

# Un problème jouet (pour comprendre, faire comprendre, vérifier)

Dans cette section, nous étudions un modèle simple ayant la forme suivante:

$$Y(t, x) = Y(t, x_0, x_1, x_2, x_3) = \left( x_0 + \frac{S}{\lambda(x_1, x_2)} \right) \exp(\lambda(x_1, x_2)t) - \frac{S}{\lambda(x_1, x_2)} + tCx_3, \quad (1)$$

avec  $\lambda(x_1, x_2) = -10 - (x_1 + x_2)$ .

Ce modèle est choisi parce qu'il a une forme générique que l'on retrouve dans de nombreuses études de durcissement:

- Dépendance temporelle (typique des problèmes instationnaires de dynamique rapide, cf. les vitesses de surface libre dans [8] par exemple),
- Vecteur de paramètres  $x = (x_0, x_1, x_2, x_3)$  qui peuvent être physique ou numérique et dont le rôle sera détaillé dans les lignes qui suivent.
- Lorsque  $C = 0$ , le modèle (1) coïncide avec la solution de l'EDO:

$$\begin{cases} \partial_t Y(t, x) = \lambda(x_1, x_2)Y(t, x) + S, \\ Y(0, x) = Y_0(x) = x_0. \end{cases} \quad (2)$$

$x_0$  paramétrise la condition initiale et  $\lambda(x_1, x_2)$  ressemble alors à une caractéristique matériau dont les paramètres physiques sont  $x_1, x_2$ .

- Lorsque  $C \neq 0$ , le modèle (1) coïncide avec la solution de l'EDO précédente (2) avec une erreur de discrétisation (spatiale):
  - $\Delta x = x_3$  telle que  $\mathcal{O}(\Delta x) = \mathcal{O}(x_3)$  avec  $C$  connue et dont l'erreur est  $\propto$  au temps considéré, i.e.  $\mathcal{O}(\Delta x) = tC\Delta x = tCx_3$ .
  - Ainsi  $x_3 = \Delta x$  joue le rôle d'un paramètre de discrétisation numérique dont l'effet sur la solution s'amointrit lorsque  $x_3 = \Delta x \rightarrow 0$ .

# Un problème jouet (pour comprendre, faire comprendre, vérifier)

## Les lois d'entrée

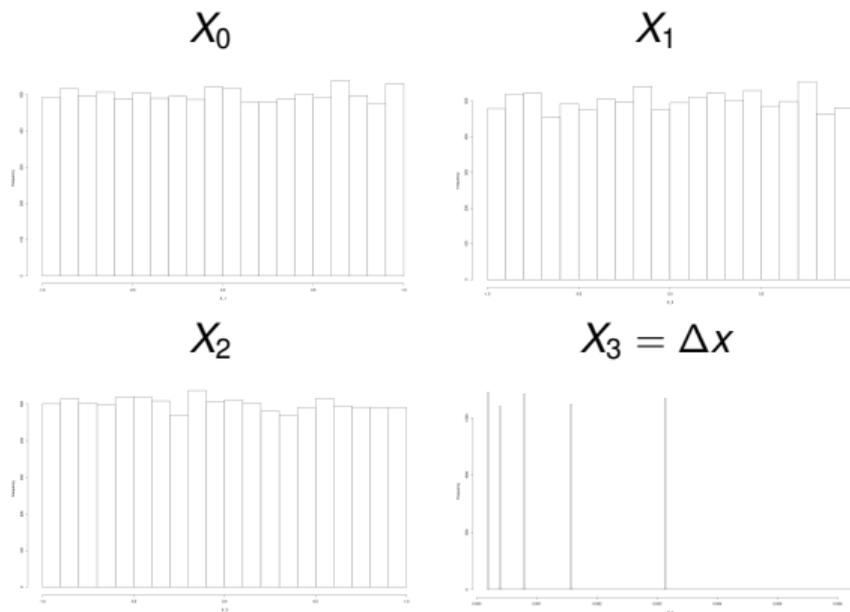
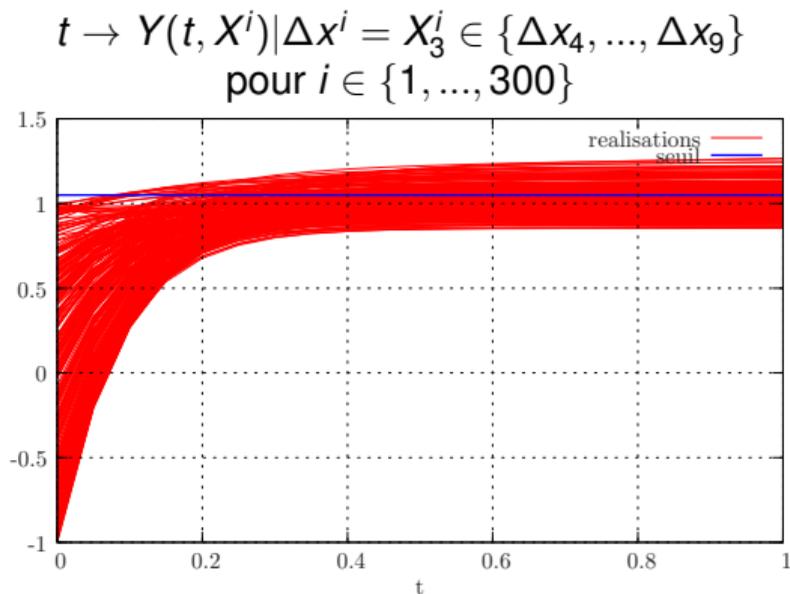
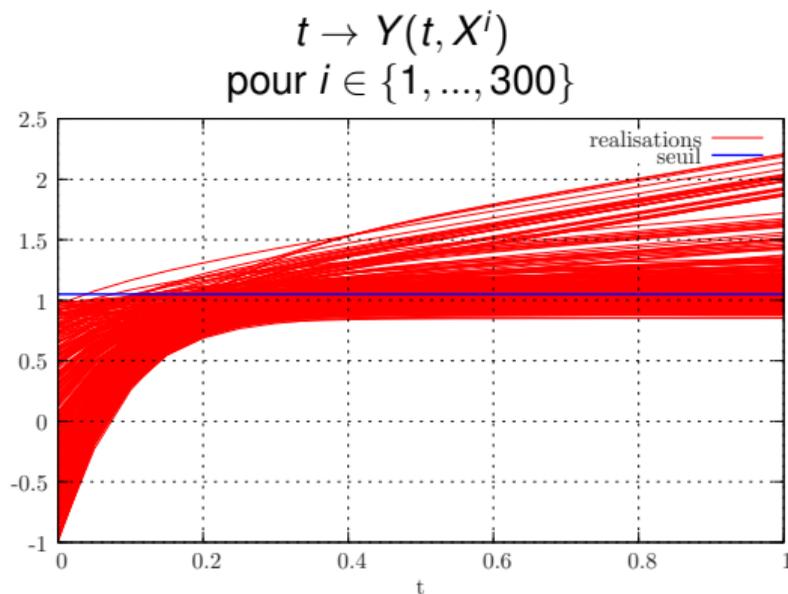


Figure 1: Histogrammes variables aléatoires  $X_0, X_1, X_2 (\sim \mathcal{U}([-1, 1]))$  et  $X_3$  (discrète).

# Un problème jouet (pour comprendre, faire comprendre, vérifier)

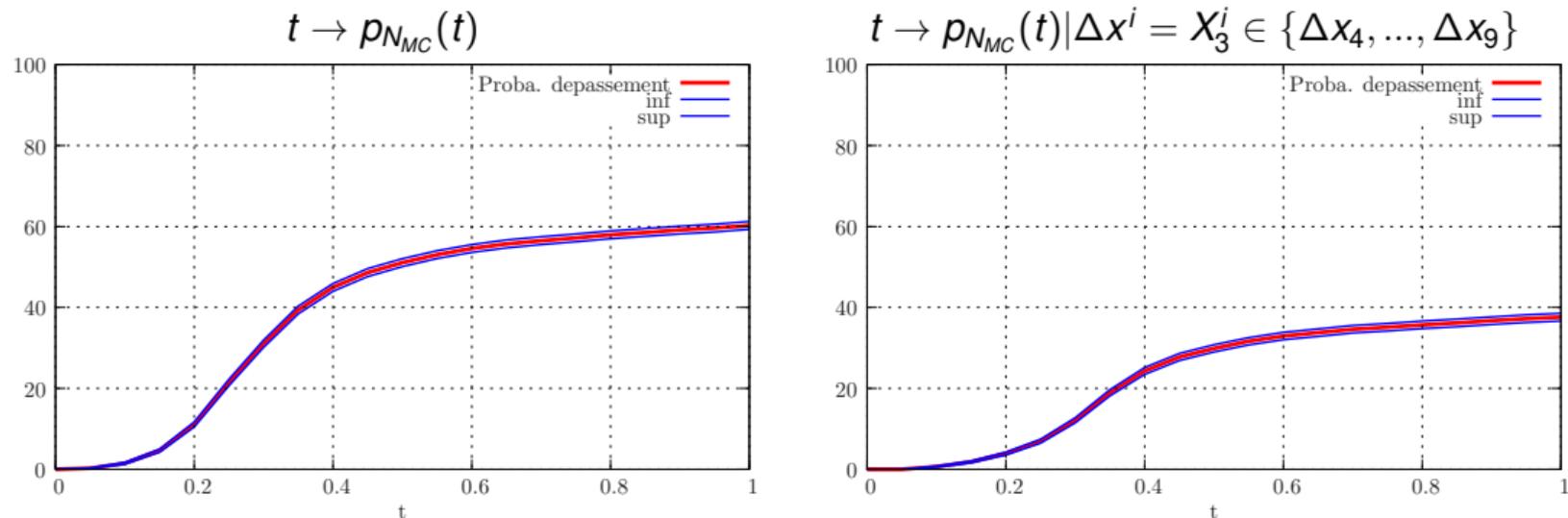
Les résultats en termes de dépassement de seuil (contexte garantie sous incertitudes)



**Figure 2:** Évolutions temporelles  $t \rightarrow Y(t, X^i)$  pour  $N_{MC} = 300$  réalisations de  $(X^i)_{i \in \{1, \dots, N_{MC}\}}$ . Gauche: la variable de discrétisation spatiale  $X_3 = \Delta x$  est échantillonnée dans  $\{\Delta x_0, \dots, \Delta x_9\}$ . Droite: la variable de discrétisation spatiale  $X_3 = \Delta x$  est échantillonnée dans  $\{\Delta x_4, \dots, \Delta x_9\}$  (i.e. maillages plus fins).

# Un problème jouet (pour comprendre, faire comprendre, vérifier)

Les résultats en termes de dépassement de seuil (contexte garantie sous incertitudes)



**Figure 3:** Évolutions temporelles  $t \rightarrow p_{N_{MC}}(t)$  et intervalles de confiance associés. Gauche: la variable de discrétisation spatiale  $X_3 = \Delta x$  est échantillonnée dans  $\{\Delta x_0, \dots, \Delta x_9\}$ . Droite: la variable de discrétisation spatiale  $X_3 = \Delta x$  est échantillonnée dans  $\{\Delta x_4, \dots, \Delta x_9\}$  (i.e. maillages plus fins).

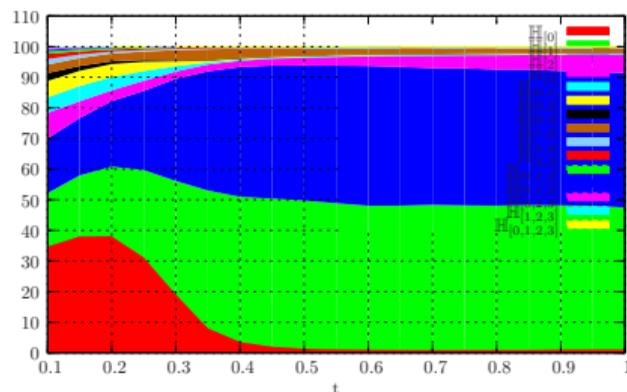
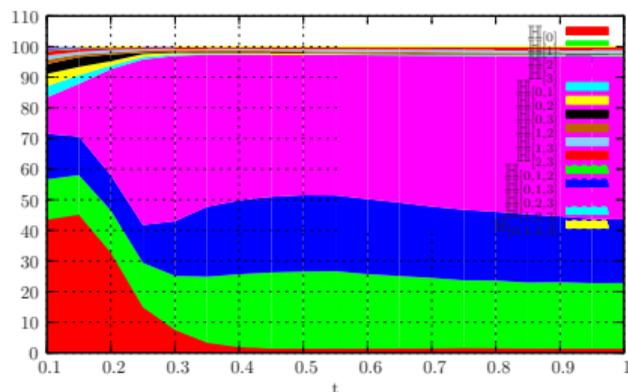
# Un problème jouet (pour comprendre, faire comprendre, vérifier)

Les indices de sensibilité à but orienté au cours du temps

$$t \rightarrow \mathbb{H}_i(t), \forall i \in \mathcal{S}$$

$$t \rightarrow \mathbb{H}_i(t), \forall i \in \mathcal{S} \text{ pour } X_3 \in \{\Delta x_4, \dots, \Delta x_9\}$$

Tous les indices



**Figure 4:** Évolution temporelle des indices HSIC appliqué au problème jouet (1). La colonne de gauche présente les indices basés sur [17, 19, 9, 13]. La colonne de droite présente les indices obtenus lorsque la variable de pas de discrétisation  $X_3 = \Delta x$  est conditionnée au maillage plus fin  $\{\Delta x_4, \dots, \Delta x_9\}$ .

# Conclusion partielle sur cette partie

## Les outils 'ETICS' exploités:

- le fameux bouquin D.G.I.P. [17],
- le papier sur les HSIC orthogonaux [19],
- le papier de P. Novello [9],
- le rapport Marrel/Sarrazin/Da Veiga/Chabridon [13]

# Plan

Etude d'un modèle d'endommagement pour le durcissement

Étude des hyperparamètres dans la conception de réseaux de neurones

Analyse de sensibilité pour la garantie (sur un exemple simple)

## Conclusion





10  $\pm$  1 ans d'ETICS déjà... Le premier comme si c'était hier

Au fait, comment j'ai compris que je ne ferai jamais carrière dans la chanson?

# Mes souvenirs hallucinés de la soirée au bar de Barcelonnette



# Mes souvenirs hallucinés de la soirée au bar de Barcelonnette



# Mes souvenirs hallucinés de la soirée au bar de Barcelonnette



# Mes souvenirs hallucinés de la soirée au bar de Barcelonnette



# Mes souvenirs hallucinés de la soirée au bar de Barcelonnette



# Références I

-  Bilel Bensaïd, Gaël Poëtte, and Rodolphe Turpault.  
An Abstract Lyapunov Control Optimizer: Local Stabilization and Global Convergence.  
*submitted to mathematical computing.*
-  Bilel Bensaïd, Gaël Poëtte, and Rodolphe Turpault.  
Lyapunov correction of momentum and RMSProp for Neural Networks Training: the first proofs of convergence.  
*to be submitted to ICML.*
-  Bilel Bensaïd, Gaël Poëtte, and Rodolphe Turpault.  
Lyapunov Deterministic Optimization for Neural Networks Training.  
*submitted to JMLR.*
-  Bilel Bensaïd, Gaël Poëtte, and Rodolphe Turpault.  
Deterministic neural networks optimization from a continuous and energy point of view.  
*Journal of Scientific Computing*, 14(96), 2023.
-  G. Blatman and B. Sudret.  
Sparse Polynomial Chaos Expansions and Adaptive Stochastic Finite Elements using a Regression Approach.  
*C. R. Méc.*, 336:518–523, 2008.
-  G. Blatman and B. Sudret.  
Efficient computation of global sensitivity indices using sparse polynomial chaos expansions.  
*Rel. Eng. Syst. Saf.*, 95:1216–1229, 2010.
-  Guillaume Chenetier.  
*Rare Event Simulation for Piecewise Deterministic Markov Processes, application in reliability assessment with PyCATSHOO tool.*  
Theses, Institut Polytechnique de Paris, September 2024.

# Références II



D. Hébert, J. Gardelle, G. Poëtte, G. Robert, V. Dubois, and P. Legrand.

Development of an equation of state to characterize an electron beam interacting with an aluminum target.  
*Journal of Applied Physics*, 133(12):125901, 03 2023.



Paul Novello, Gaël Poëtte, David Lugato, and Pietro M Congedo.

Goal-Oriented Sensitivity Analysis of Hyperparameters in Deep Learning.  
*Journal of Scientific Computing*, page 94:45, 2023.



Paul Novello, Gaël Poëtte, David Lugato, and Pietro Marco Congedo.

Goal-oriented sensitivity analysis of hyperparameters in deep learning.  
*Journal of Scientific Computing*, 94(3):45, 2023.



Paul Novello, Gael Poette, David Lugato, Simon Peluchon, and Pietro Marco Congedo.

Accelerating hypersonic reentry simulations using deep learning-based hybridization (with guarantees).  
*Journal of Computational Physics*, 498:112700, 2024.



G. Poëtte and D. Lucor.

Non Intrusive Iterative Stochastic Spectral Representation with Application to Compressible Gas Dynamics.  
*J. of Comput. Phys.*, 2011.  
DOI information: 10.1016/j.jcp.2011.12.038.



G. Sarrazin, A. Marrel, S. Da Veiga, and V. Chabridon.

Towards more interpretable kernel-based global sensitivity analysis: new insights into Sobolev kernels and their feature maps.  
Technical Report DO 08, CEA/DES/IRENE/DER/SESI/LEMS/NT, 2022.

# Références III



I.M. Sobol.

Uniformly distributed sequences with an additional uniform property.  
*USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 16(5):236 – 242, 1976.



Adrien Spagnol, Rodolphe Le Riche, Sébastien Da Veiga, and Olivier Roustant.

Global sensitivity analysis for optimization with variable selection.  
In *PGMO Days 2017*, Saclay, France, November 2017.



B. Sudret.

Global Sensitivity Analysis using Polynomial Chaos Expansion.  
*Rel. Engrg. Syst. Saf.*, 93:964–979, 2007.



S. Da Veiga, F. Gamboa, B. Iooss, and C. Prieur.

*Basics and Trends in Sensitivity analysis, theory and practice in R*.  
Computational Science and Engineering. SIAM, 2020.



Sébastien Da Veiga.

Global sensitivity analysis with dependence measures.  
2013.



Sébastien Da Veiga.

Kernel-based anova decomposition and shapley effects – application to global sensitivity analysis.  
2021.  
arXiv:2101.05487v1.

# Références IV



Clément Walter.

*Using Poisson Processes for rare event estimations.*  
PhD thesis, Université de Paris VII, November 2016.



X. Wan and G.E. Karniadakis.

Beyond Wiener-Askey Expansions: Handling Arbitrary PDFs.  
*SIAM J. Sci. Comp.*, 27(1-3), 2006.



Waloddi Weibull.

A statistical distribution function of wide applicability.  
*Journal of Applied Mechanics*, 18:293–297, 1951.



D. Xiu, D. Lucor, C.-H. Su, and G. E. Karniadakis.

Stochastic Modeling of Flow-Structure Interactions using Generalized Polynomial Chaos.  
*J. Fluid Eng.*, 124:51–59, 2002.



Jean-Luc Zinszner.

*Identification des paramètres matériau gouvernant les performances de céramiques à blindage.*  
Theses, Université de Lorraine, December 2014.